

MASTERTHESIS

Ist Deutschland bereit für UHD?

Analyse der technischen Parameter,
physiologischer Limitierungen und aktueller, sowie
zukünftiger Anwendungen von
Ultra High Definition Video
in Deutschland

Herr

Martin Lechtschewski

Studiengang:

Industrial Management – Media Engineering

Seminargruppe:

ZM13w2-M

Professor:

Prof. Dr.-Ing. Wilfried Schmalwasser

Zweitbetreuer:

Dr.-Ing. Jörg Krupke

Bibliografische Kurzbeschreibung

Lechtschewski, Martin

Ist Deutschland bereit für UHD?

Analyse der technischen Parameter, physiologischer Limitierungen und aktueller, sowie zukünftiger Anwendungen von Ultra High Definition Video in Deutschland

Masterthesis an der Hochschule Mittweida - University of Applied Science

2016, 113 Seiten

Referat

Die vorliegende Arbeit analysiert den Ultra-High-Definition-Videostandard (UHD) im Kontext bisheriger Formatentwicklungen im Videobereich. Die Parameter von UHD-Video werden in ihrer Abhängigkeit voneinander erklärt und in Beziehung gesetzt zu den physiologischen Grenzen der visuellen Wahrnehmung des Menschen. Basierend auf den Analyseergebnissen wird eine Prognose über mögliche zukünftige Anwendungsfelder von UHD in Deutschland gegeben.

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung und Problemstellung	5
2 Bildübertragungssysteme	6
3 Der limitierende Faktor Mensch	10
3.1 Die Farbwahrnehmung des Menschen	12
3.2 Die Kontrastwahrnehmung.....	16
3.3 Die örtliche Auflösung	17
4 Überblick über bisherige Videostandards	18
4.1 SD - Standard Definition Video	18
4.2 Grundverfahren der Datenkompression bei Video	20
4.3 MPEG-2-Videokompression	21
4.4 HD - High Definition Video	24
4.5 Verbesserungen der Datenkompression durch MPEG-4 (H.264).....	27
4.6 Der HD-Farbraum Rec.709	29
5 Die Spezifikationen von Ultra High Definiton (UHD).....	33
5.1 Die örtliche Auflösung	34
5.2 Die Bildrate	37
5.3 Der Dynamikumfang – High Dynamic Range (HDR)	41
5.4 Der erweiterte Farbraum (BT.2020 und XYZ).....	43
5.5 UHD Audio.....	45
5.6 Das Datenaufkommen	46
5.7 Der H.265-Codec (HEVC)	48
6 UHD-Kameras.....	53
6.1 Aktuelle Marktübersicht.....	54
6.2 Spezielle Objektive für UHD	58
6.3 Problematik der Bildwandlung	59
6.4 Aufzeichnungsarten.....	61
6.4.1 Videoaufzeichnung	61
6.4.2 RAW-Aufzeichnung.....	61
6.4.3 Log-Aufzeichnung	63
6.5 Aufzeichnungsmedien und -formate	64
6.5.1 SDHC-und SDXC-Karten	65
6.5.2 SXS Pro+-Karten.....	66
6.5.3 CFast 2.0-Karten	67

6.5.4 REDMAG 1.8" SSD.....	67
6.5.5 Sony SRMemory	67
6.5.6 PhantomFlex – interne RAM-Aufzeichnung	68
6.5.7 XAVC	68
6.5.8 Apple ProRes	69
6.5.9 Avid DnxHR	71
7 Video-Schnittstellen	71
7.1 Serial Digital Interface (SDI) über Koaxialkabel	72
7.2 Glasfaserschnittstellen	76
7.3. Video over IP	78
7.4 HDMI	80
7.5 Displayport.....	81
8 UHD-Displays	82
9 Distribution von UHD-Video	86
9.1 TV-Auswertung.....	86
9.1.1 DVB-S2.....	87
9.1.2 DVB-C.....	88
9.1.3 DVB-T2.....	88
9.2 Online-Auswertung und IP-TV.....	91
9.3 Speichermedien.....	93
9.4 Kinoauswertung	95
9.5 Verfügbarkeit von UHD-Inhalten im Jahr 2016	95
10 Mögliche weitere Anwendungsgebiete von UHD	96
11 Blick nach vorn	100
Abbildungsverzeichnis.....	105
Tabellenverzeichnis.....	107
Literaturverzeichnis	108
Selbständigkeitserklärung	113

1 Einleitung und Problemstellung

Der Bereich der Medientechnik zählt zweifelsohne zu den schnelllebigen Industriezweigen. Gerade im Segment der Unterhaltungselektronik versuchen Hersteller und Dienstleister ihre Kunden von immer neuen Produkten zu überzeugen, deren Lebenszyklen sich ständig verkürzen. Einige Technologien verlieren dadurch nach einem anfänglichen Hype allerdings auch sehr schnell wieder an Bedeutung. So geschehen am Beispiel Live-Stereo-3D-TV, das nur noch eine Nischenrolle einnimmt. Der Grund für einen solchen Bedeutungsverlust kann entweder eine unausgereifte Technologie (z.B. Notwendigkeit einer 3D-Brille) oder schlichtweg der fehlende Mehrwert für den Endkunden sein.

Mit Ultra High Definition (UHD) - Video, der jüngsten Generation der Videostandards, entwickelt sich eine Technologie, die Potential zum langfristigen Erfolg haben könnte. Die vorliegende Arbeit ordnet UHD technisch vergleichend ein, stellt die festgelegten Parameter vor und bespricht aktuell resultierende Probleme, sowie mögliche Lösungsansätze. Insbesondere geht es dabei um die Abhängigkeiten von verschiedenen Bildparametern untereinander und die resultierenden Datenraten eines UHD-Videostromes. Nach dieser theoretischen Betrachtung werden konkrete Umsetzungen und Entwicklungen der Videoindustrie vorgestellt. Dabei sollen speziell die Gegebenheiten in Deutschland analysiert werden. Diese Betrachtungen verschaffen einen Überblick darüber, was aktuell bereits möglich ist, bzw. in sehr naher Zukunft umgesetzt wird. Die Ergebnisse dieser Momentaufnahme erlauben bereits eine erste Prognose über die Entwicklung auf dem deutschen Markt. Am Ende folgt eine Vorstellung weiterer denkbarer Anwendungsszenarien, in denen UHD einen Mehrwert liefern könnte. Dem Autor ist dabei die Unterscheidung zwischen drei grundsätzlichen Segmenten wichtig. Diese können wie folgt benannt werden:

- UHD- Akquise (Aufnahme durch eine Kamera)
- UHD- Distribution (Verteilung eines Videostroms)
- UHD- Projektion (Darstellung durch Monitor, Projektor, etc.)

Da es im letzten Bereich eine Rolle spielt, was der Betrachter an Bildinformation überhaupt wahrnehmen kann, ist den weiteren technischen Betrachtungen ein Exkurs in die Biologie vorangestellt. Denn, Akquise und Distribution ausgeklammert, spielt die Limitierung des Menschen hier eine große Rolle. Eine Bildauflösung, die weit über das hinausgeht, was ein

menschliches Auge auflösen kann, bringt in der Projektion keinen Mehrwert. An dieser Stelle könnten enorm hohe Videoauflösungen durch den aktuellen Trend von VR¹-Brillen mit sehr geringem Betrachtungsabstand eine ganz neue Daseinsberechtigung erhalten.

2 Bildübertragungssysteme

Greift man die Unterteilung von oben wieder auf, so setzt sich ein Bildübertragungssystem im Allgemeinen aus Aufnahmesystem, Übertragungssystem und Darstellungssystem zusammen. Je nach Anwendungsfall bestehen sehr unterschiedliche Anforderungen an die einzelnen Systeme. Formuliert man den Anspruch von Video im Unterhaltungsbereich so allgemein wie möglich, geht es letzten Endes um das Erreichen einer hohen Immersion beim Betrachter. *„Immersion beschreibt den Eindruck, dass sich die Wahrnehmung der eigenen Person in der realen Welt vermindert und die Identifikation mit einer Person in der virtuellen Welt vergrößert.“*² Das digitale Videobild soll sich dazu in der Wahrnehmung durch den Menschen sehr nahe an der Realität bewegen oder eben beim Spielfilm den Zuschauer in die Handlung „eintauchen“ lassen. Natürlich wirken unterschiedlichste Faktoren auf die Immersion des Betrachters und damit ist sie schwer quantifizierbar. Nach Ryan wird eine hohe Immersion nur dann erreicht, wenn das Medium für den Nutzer transparent wird, also nicht mehr als solches wahrgenommen und die störenden Faktoren von außen ihm nicht mehr an die Existenz der physikalischen Welt erinnern.³ Das erleben wir beispielsweise im abgedunkelten Kinosaal, in dem ein großer Teil unseres Sichtfeldes von der Leinwand ausgefüllt wird. Mittlerweile kommt im Begriff „Heimkino“ durchaus das Bestreben zum Ausdruck, diesen Betrachtungszustand auch im eigenen Wohnzimmer zu erreichen. Inwiefern UHD dabei hilfreich ist, soll ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Generell soll das gesamte Bildübertragungssystem auf UHD bezogen mit seinen besonderen Herausforderungen analysiert werden. Dieses System beginnt mit der Aufnahme über eine Kamera, durchläuft eine Verarbeitung, Speicherung und Distribution und endet mit der Ausgabe über einen Monitor.

¹ Virtual Reality (aus dem Englischen: Virtuelle Realität)

² Quelle: Wikipedia: [https://de.wikipedia.org/wiki/Immersion_\(virtuelle_Realit%C3%A4t\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Immersion_(virtuelle_Realit%C3%A4t)), Abruf im Oktober 2015

³ Vgl.: Ryan 1994, Punkt 8

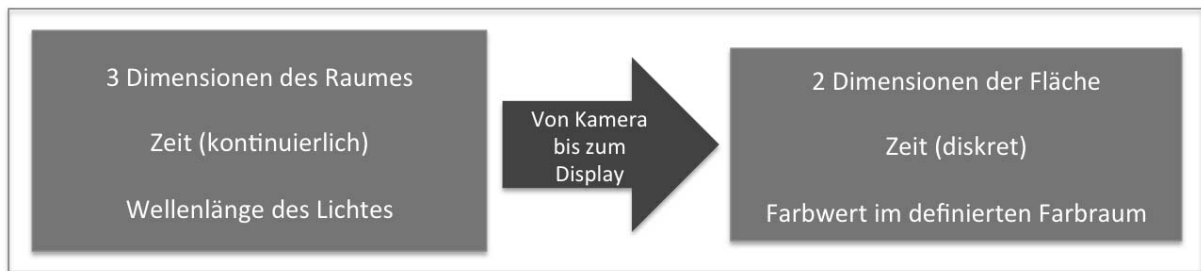


Abb. 1: Klassisches Bildübertragungssystem

Wenn am Ende des Bildübertragungssystems das Original nicht mehr von der Projektion zu unterscheiden ist, wäre ein Optimum in diesem Sinne erreicht. Tatsächlich ist zu einer Annäherung an diesen Zustand ebenso eine räumliche Wahrnehmung des projizierten Bildes förderlich, da der Mensch seine Umwelt schließlich stereografisch wahrnimmt. Für ein solches System sind grundsätzlich zwei Videosignale erforderlich, in denen ein Bild für das linke und eins für das rechte Auge übertragen werden. Ein stereografisches Videosignal bringt eine wahrnehmbare räumliche Tiefe durch horizontale Verschiebung der beiden Kamerabilder (Disparität) als weitere Dimension hinzu. (Siehe Kapitel 10) In der Praxis werden die beiden Videobilder zur Übertragung in ihrer Auflösung halbiert und in einem einzigen HD-Feed übertragen. Der Decoder muss die beiden Bilder wieder voneinander trennen. Dieser Umstand soll hier nur verdeutlichen, dass ein übertragenes Videosignal durchaus von dem unterscheiden kann, was am Ende tatsächlich auf dem Monitor betrachtet wird. Es ist dazu jedoch dringend erforderlich, dass Encoder und Decoder zueinander passen. Das wird durch entsprechende Normierungen der Hardware reglementiert. Allgemein ist die Durchsetzung neuer Industrienormen ein langwieriger Prozess, da die Umstellung häufig mit hohen Investitionen verbunden ist. Das schließt den Videobereich nicht aus. Hier kommt erschwerend hinzu, dass zumindest für eine Übergangszeit entweder eine Abwärtskompatibilität zum vorherigen Standard gegeben sein muss oder ein Parallelbetrieb von altem und neuem Standard erfolgen muss. Der Mitteldeutsche Rundfunk brauchte bis 2013, um sein Programm auf High Definition umzustellen. Mehr als drei Jahre nachdem die ARD diesen Schritt bereits gegangen war. Und dennoch ist HD im Jahr 2015 in Deutschland noch immer nicht der flächendeckende Standard, bzw. wird die gegenüber SD höhere Auflösung von einigen Privatsendern als Premiumprodukt vermarktet. Kostenlos sind die privaten Sender bislang weiterhin nur in SD-Qualität zu empfangen. An dieser Vermarktungsstrategie wird sich wohl in naher Zukunft

auch nichts ändern.⁴ Auf terrestrischem Weg werden über DVB-T1 auch 2016 immer noch ausschließlich SD-Signale gesendet.

Während dieser Marktzustand als wenig fortschrittlich gesehen werden kann, sind es die Bezahlender, die sich mit Innovationen abzuheben versuchen. Sei es das bereits angesprochene Live-Stereo-3D oder eben erste 4K-Live-Übertragungstests (z.B. des DFB-Pokalfinales 2015 aus Berlin). Fristet Stereo-3D-TV mittlerweile ein Nischendasein, das den anfänglichen Hype längst hinter sich hat, so sind die von der ITU⁵ im Jahr 2012 unter der Bezeichnung Ultra High Definition (kurz: UHD) vereinbarten Standards weit mehr als ein Spartenprodukt. Es geht ähnlich wie bei der Umstellung von SD auf HD um eine deutliche Verbesserung der Bildqualität. Die Maßnahmen beschränken sich nicht nur auf die Erhöhung der örtlichen Auflösung, auch wenn das die offensichtlichste Veränderung ist. Natürlich bringt eine Umstellung auf einen neuen Standard eine ganze Reihe von Problemen mit sich, auf die im Rahmen dieser Arbeit eingegangen werden soll. Auf Produktionsseite spielt es eine essentielle Rolle, ob eine vorhandene HD-Infrastruktur weiterhin genutzt werden kann, bzw. welche Maßnahmen notwendig sind, um eine UHD-Produktion zu realisieren. Gleiches gilt für die Empfängerseite. Dabei ist entscheidend, ob der Zuschauer im neuen UHD-Standard einen Mehrwert sieht, für den er bereit ist, in neue Empfangs-, bzw. Wiedergabetechnik zu investieren.

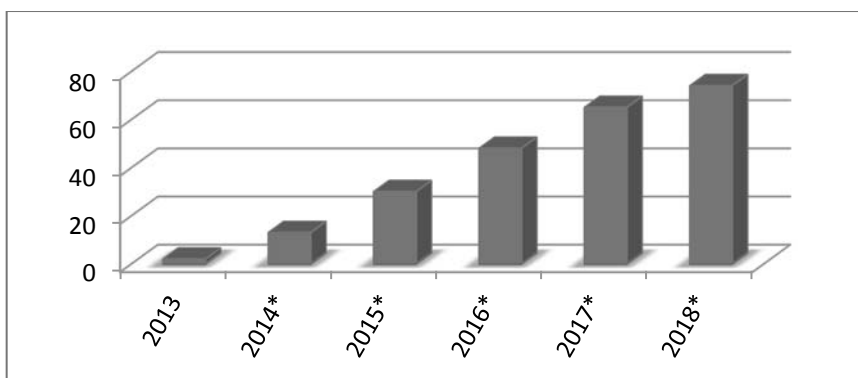


Abb. 2: Prognose über den Absatz von UHD-TV-Geräten⁶ (2013 erhoben)

⁴ Artikel „HD-Signale über Hausantenne: DVB-T2“ unter <http://www.film-tv-video.de/newsdetail+M58304312d9b.html>, Abruf am 24. Juni 2015

⁵ International Telecommunication Union

⁶ vgl.: Statista: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/270070/umfrage/prognose-zum-absatz-von-ultra-hd-fernsehgeraeten-weltweit/>, Abruf im Dezember 2015

Es existieren sogar bereits erste Consumer-Kameras, die in der Lage sind, Bewegtbilder in 4K aufzuzeichnen, genauso Monitore, die diese Bilder darstellen können. In der professionellen Videoproduktion sind Aufnahmen in 4K-Auflösung bereits keine Seltenheit mehr, selbst wenn die finale Auswertung sich zunächst auf HD beschränkt. So kann die Verfügbarkeit höher aufgelöster Bilder gerade bei einer aufwendigen Nachbearbeitung sehr große Vorteile mit sich bringen. (siehe Kapitel 6). Nicht zu vernachlässigen sind auch die erhöhten Datenraten (auch hier werden die Parallelen zur SD-3HD-Umstellung deutlich) und die damit einhergehenden Bandbreiten zur Übertragung. Außerdem werden neue Codecs erforderlich, um die größeren Daten effektiv zu verarbeiten. Bislang beschränkte sich die Broadcast-Ausstrahlung von UHD auf wenige Testübertragungen. Dennoch scheint sich der Weg zur Verbreitung langsam zu ebenen. Mit DVB-T2 steht ein terrestrischer Übertragungsstandard kurz vor der Einführung in Deutschland, der auch für UHD-Übertragungen interessant werden könnte (siehe Kapitel 9.1.3). Damit wären sogar höhere Datenraten übertragbar als momentan über den Satellitenbroadcast DVB-S2.⁷ Genau dieser Bereich der UHD-Distribution, der sich von der Kamera bis zum Bildschirm zu Hause erstreckt, ist bislang noch wenig entwickelt. Neben den klassischen Verteilwegen über Satellit und Kabel, gewinnt die Übertragung über das Internet als Live-Stream oder Video-on-Demand eine immer größere Bedeutung. Daraus ergibt sich, dass große Anbieter wie Netflix und Amazon mit ihren Angeboten maßgeblichen Einfluss auf die Verbreitung von UHD haben werden. Dieser Einfluss könnte sogar größer werden als der klassischer TV-Sender.

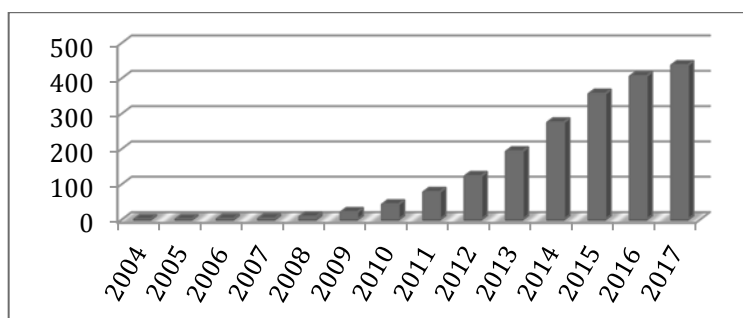


Abb. 3: Umsätze mit Video on Demand in Deutschland von 2004 bis 2012 und Prognose bis 2017 (in Millionen Euro)⁸

⁷ Artikel „HD-Signale über Hausantenne: DVB-T2“ unter <http://www.film-tv-video.de/newsdetail+M58304312d9b.html>, Abruf am 24. Juni 2015

⁸ vgl. Statista: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/246331/umfrage/umsaetze-mit-video-on-demand-vod-in-deutschland/>, Abruf im Dezember 2015

Die zentrale Frage lautet natürlich, inwieweit die bestehende digitale Infrastruktur für die großen Datenmengen ausreicht, bzw. welche Wege es gibt, um hochauflöstes Video zu übertragen (siehe Kapitel 9.2) In der Abbildung 3 ist ersichtlich, dass IP-basierte Distributionskanäle immer größere Bedeutung einnehmen. Mit hoher Sicherheit werden sie zukünftig relevanter sein als die klassischen DVB⁹-Verfahren.

3 Der limitierende Faktor Mensch

Es wurde eingangs bereits erläutert, welche Ziele mit der Verbesserung der Videoqualität im Allgemeinen verfolgt werden. Wenn die Minimierung des Unterschiedes zwischen der realen Welt am Eingang eines Bildübertragungssystems und der projizierten Abbildung an dessen Ausgang als Ziel definiert wird, müssen die biologischen Restriktionen des Betrachters bekannt sein. Anders ausgedrückt: Bevor die konkreten technischen Spezifikationen eines zukünftigen Videoformates genau betrachtet werden, stellt sich zunächst einmal die Frage, welche Parametergrößen durch den Menschen theoretisch überhaupt wahrnehmbar sind. Eine Verbesserung der Bildqualität macht nur bis zu einem Punkt Sinn, an dem die menschliche Wahrnehmung aufgrund der biologischen Gegebenheiten an ihre Grenzen stößt. Zumindest gilt das für die native Darstellung eines Videobildes auf einem Monitor.

Der Mensch verfügt durch seine Sinnesorgane nur über eine begrenzte Wahrnehmungsfähigkeit seiner Umwelt.¹⁰ Auf unseren Sehapparat bezogen zeigt sich beispielsweise, dass wir elektromagnetische Wellen nur in dem verhältnismäßig kleinen Wellenlängenbereich von 400-700 Nanometern als sichtbares Licht wahrnehmen können (siehe Abbildung 4).

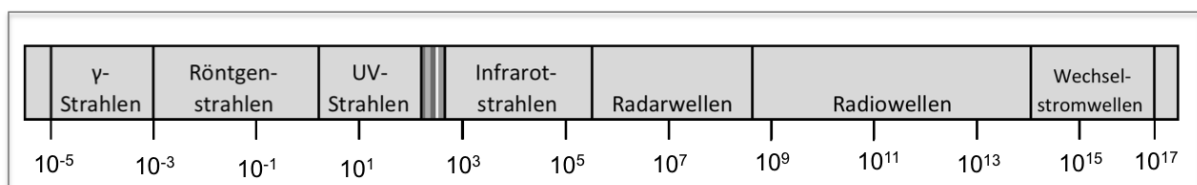


Abb. 4: Wellenlängenbereiche elektromagnetischer Strahlung

⁹ Digital Video Broadcast (aus dem Englischen: Digitaler Rundfunk)

¹⁰ vgl. Hagendorf 2011, S. 14

Reize müssen allgemein eine bestimmte Intensität aufweisen, um wahrgenommen zu werden. So können wir weder die Bewegung des Mondes am Himmel (zu langsam), noch eine fliegende Gewehr­kugel in Echtzeit (zu schnell) mit unseren Augen erfassen. Weiterhin weicht die menschliche Wahrnehmung von dem physikalisch Messbaren ab, was es erschwert, die Qualität eines Videobildes über rein technische Parameter zu beurteilen. In der Abbildung 5 ist die Zöllner-Täuschung als einfaches Beispiel für diesen Effekt dargestellt. Obwohl die Linien parallel sind (physikalisch messbar), erscheinen sie schräg zueinander (menschliche Wahrnehmung).¹¹ Es wird daher vermutet, dass neben der technischen Qualität eines Videos, die inhaltliche Ebene eine herausragende Bedeutung für die Wahrnehmung und die in Kapitel 1 angesprochene Immersion besitzt. Ein Zuschauer, der keinen Bezug zum Inhalt eines Videos hat, wird vermutlich kaum eine Immersion erleben.



Abb. 5: Zöllner-Täuschung

Da vorrangig die visuellen Aspekte von UHD betrachtet werden¹², erscheint es notwendig, einige Grundlagen der Psychophysik aufzugreifen. Darüberhinaus könnte eine Einbeziehung von neurobiologischen Indikatoren durchaus ein Gegenstand weiterer Forschung sein. So ließe sich beispielsweise untersuchen, ob es einen kognitiven Belastungsunterschied beim Betrachten von Videobildern in Abhängigkeit von der örtlichen Auflösung gibt. Weitergehende Untersuchungen in dieser Richtung sind allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

¹¹ vgl. Hagendorf 2011, S. 19

¹² im UHD-Standard werden auch Verbesserungen des Tons spezifiziert

3.1 Die Farbwahrnehmung des Menschen

Im Wesentlichen stellt sich die Frage, wie ein Mensch Bilder mit seinen Augen sieht. Die Psychophysik liefert dazu Methoden, mit denen Wahrnehmungsleistungen- und -schwellen bestimmt werden können. Es geht dabei um den Zusammenhang zwischen physikalischen Energiemustern an den Rezeptoren und deren Wahrnehmungen.¹³ Fechner untersuchte den Zusammenhang zwischen Reizintensität und Empfindungsstärke, in dem er Probanden unterschiedlich starken Reizen aussetzte und sie nach ihrer empfundenen Empfindungsstärke befragte. Sein großes Problem bestand darin, dass er auf die subjektiven Aussagen seiner Probanden angewiesen war. Er konnte nicht ausschließen, dass die Aussagen durch Erwartungshaltungen verzerrt wurden. Für Fechner spielt der Begriff der Wahrnehmungsschwelle eine zentrale Bedeutung. Dieser bezeichnet den Übergang von einer perzeptiven Erfahrung zu einer anderen als Resultat einer minimalen Änderung des physikalischen Reizes.¹⁴ In Bezug auf die Betrachtung eines Videobildes auf einer Projektionsfläche kann die Fähigkeit des Betrachters, die einzelnen Pixel als solche zu erkennen, als Wahrnehmungsschwelle definiert werden. In diesem Fall wäre es erstrebenswert, unter dieser Schwelle zu bleiben, um den Eindruck eines „realistischen“ Bildes aufrecht zu erhalten. Die hier beschriebene Schwelle ist eine Absolutschwelle des Reizes, da sie zwischen einem nicht wahrnehmbaren Reiz (einzelnes Pixel wird vom Auge nicht erkannt) und einem wahrnehmbaren Reiz (Auge kann einzelnes Pixel erkennen) unterscheidet.

Fechner definiert weiterhin eine Unterschiedsschwelle, die eine Reizintensität ausdrückt, die erforderlich ist, um einen Reiz von einem anderen Reiz zu unterscheiden. Wieder auf das menschliche Auge bezogen, kann man hier die Wahrnehmung von Helligkeiten anführen. Eine damit verbundene Frage könnte lauten, um welchen Wert die Luminanz in einem Bild verändert werden muss, um vom Betrachter wahrgenommen zu werden. Dieser Aspekt spielt bei UHD in Form der Bilddynamik eine wesentliche Rolle. (siehe Kapitel 4.3) Natürlich sehen nicht alle Menschen gleich gut. Aus diesem Grund bilden über Experimente ermittelte Werte immer nur eine ungefähre Richtlinie, die von Person zu Person variieren kann. Im Bezug auf die Ausgangssituation einer technischen Betrachtung sollte man einen

¹³ vgl. Hagendorf 2011, S. 42

¹⁴ vgl. Hagendorf 2011, S. 43

Toleranzbereich einhalten. Wieder auf das Betrachten von Videobildern bezogen, ist damit gewährleistet, dass kein Betrachter die einzelnen Pixel erkennen kann.

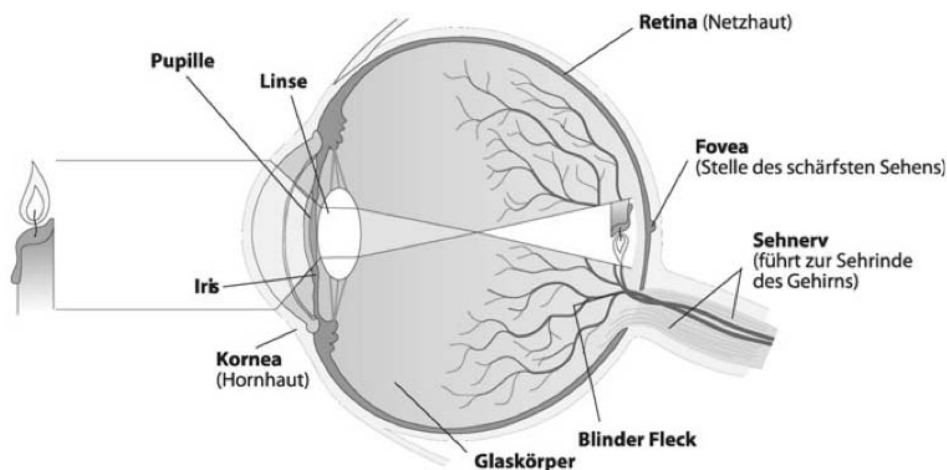


Abb. 6: Das menschliche Auge¹⁵

Wenn wir Bilder sehen, nehmen wir Licht verschiedener Wellenlängen wahr. Bei diesem Prozess treffen die Lichtstrahlen durch die lichtdurchlässige Hornhaut und die Pupille (ein Loch in der Iris) auf die Linse. Der Durchmesser der Pupille passt sich an die Intensität des Lichtes an und regelt so die Lichtmenge, die auf die Linse trifft. Er beträgt in sehr heller Umgebung zwei Millimeter und bei tiefer Dunkelheit acht Millimeter.¹⁶ Der Effekt der Pupillenöffnung ist vergleichbar mit der Blendenöffnung an Kameraobjektiven und hat auch beim Auge Einfluss auf die Schärfentiefe. Die Linse wird von den sogenannten Ziliarmuskeln bewegt. Nachdem das Licht die Linse verlassen hat, passiert es den Glaskörper und trifft schließlich auf die Netzhaut, auf der sich die Photorezeptoren befinden. Diese unterscheiden sich in etwa fünf Millionen Zapfen und 90 Millionen Stäbchen. Die Zapfen sind vor allem bei Helligkeit aktiv und bilden die Grundlage der Farb- und Detailwahrnehmung. Die Stäbchen arbeiten bei geringer Helligkeit. Die Photorezeptoren enthalten spezielle Pigmente, in denen Lichtsignale in neuronale Signale umgewandelt werden (Transduktion). Während es nur einen Stäbchentyp gibt, existieren drei verschiedene Zapfentypen, die in jeweils unterschiedliche Wellenlängenbereiche ihre maximale Sensibilität erreichen. Diese Bereiche

¹⁵ Quelle: Hagendorf 2001, S. 54

¹⁶ vgl. Hagendorf 2001, S. 55

liegen bei 440, 530 und 560 Nanometern. Die Häufigkeit der einzelnen Photorezeptoren ist in Abbildung 7 dargestellt.

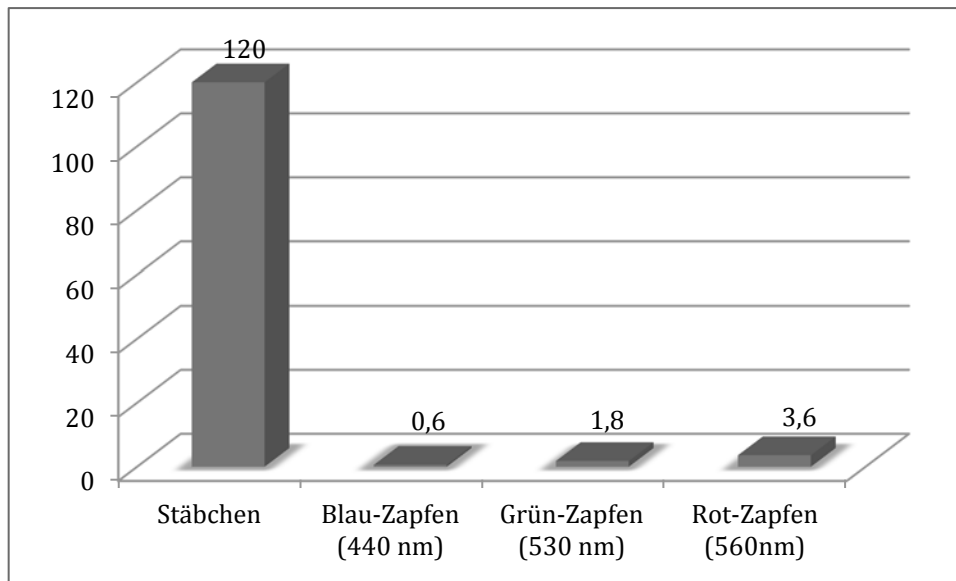


Abb. 7: Vorkommen von Photorezeptoren im menschlichen Auge in Mio

Diese unterschiedliche Verteilung der Quantitäten wirkt sich direkt auf unser Sehvermögen aus und wird auch bei der Videokompression in Form der Farbunterabtastung (siehe Kapitel 4.2) ausgenutzt. Bei der Weiterleitung von Reizen werden die Aktivitäten mehrerer Stäbchen in den sogenannten bipolaren Zellen gebündelt. Das führt zu einem räumlichen Auflösungsverlust, aber gleichzeitig zu einer höheren Helligkeitsempfindlichkeit. Im Fall der Zapfen werden die Aktivitäten der einzelnen Rezeptoren nicht gebündelt. An der Stelle auf der Netzhaut, an der die Dichte der Zapfen ihr Maximum erreicht¹⁷, besitzen sie eine hohe räumliche Auflösung bei geringer Empfindlichkeit. Dadurch begründet sich die bereits angesprochene Tatsache, dass Zapfen nur bei Helligkeit aktiv werden, Stäbchen hingegen aufgrund der Bündelung auch in Dunkelheit noch arbeiten, allerdings mit einer verminderten örtlichen Auflösung. Hierdurch ist auch erklärt, dass Menschen in der Dunkelheit keine Farben mehr wahrnehmen können.

Zur Bestimmung des Luminanzanteils eines Videosignals zieht man die Kurve der spektralen Hellempfindung des Menschen in Bezug zu den Bildschirmprimärvalenzen heran.

¹⁷ Dieser Bereich wird als Fovea bezeichnet. Es ist der Punkt des schärfsten Sehens.

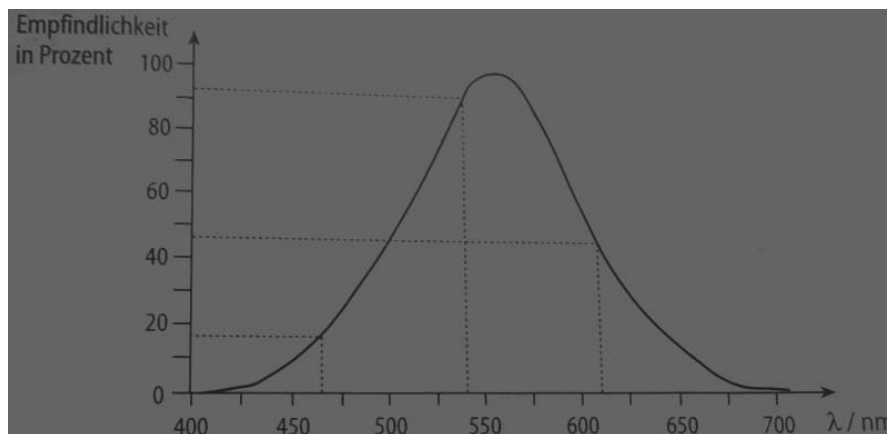


Abb. 8: Spektrale Hellempfindung des Menschen in Abhängigkeit der Wellenlänge des Lichtes

Aus Abbildung 8 geht hervor, dass der menschliche Sehsinn bei einer Wellenlänge von 540 Nanometern am empfindlichsten auf Luminanzunterschiede reagiert. Aus diesem Grund fallen Grünfarbstiche in Videobildern stärker auf als Rot- und Blaustriche. Diese spektrale Hellempfindung nutzt man weiterhin für die Normierung der Luminanz- und Chrominanzkomponenten (siehe Kapitel 4.1).

Grundsätzlich gliedert sich die menschliche Farbwahrnehmung in die drei Dimensionen Farbton (Wellenlänge), Helligkeit und Sättigung. Eine Farbe (Farbvalenz) hängt demnach immer von diesen drei Parametern ab, die einen sogenannten Farbraum aufspannen. In der Abbildung 9 ist beispielhaft der RGB-Farbraum dargestellt. Ein bestimmter Farbton ergibt sich durch die drei Koordinaten Rot, Grün und Blau. Gleichzeitig ist jeder Punkt über seinen Abstand zur Unbuntgeraden¹⁸ in einer zu dieser orthogonalen Ebene definiert. Dieser Abstand ist die Sättigung¹⁹. Der zweite Parameter ist der Winkel. Dieser legt den Farbton²⁰ fest. Der dritte Parameter, die Helligkeit ist in diesem Fall der Skalenwert der Unbuntgeraden.

¹⁸ engl. grayscale

¹⁹ engl. Saturation

²⁰ engl. Hue

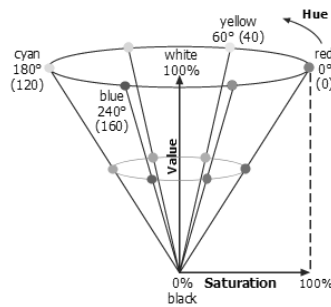
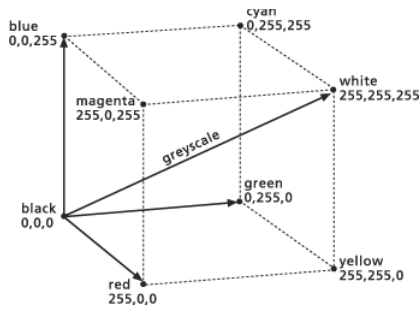


Abb. 9: RGB-Farbraum

Es existieren neben dem RGB-Farbraum viele weitere Darstellungsformen. So lassen sich die drei Dimensionen auch durch Hell-Dunkel-, Rot-Grün- und Gelb-Blau-Wert beschreiben. Zur Farbraumdarstellung werden dreidimensionale Modelle von geometrischen Körpern verwendet. Diese bezeichnet man als Farbkörper. In ihnen werden die verschiedenen Farborte mit kontinuierlichen Verbindungen dargestellt. Die von den Farbkörpern eingeschlossenen Bereiche umfassen alle vom Sehsinn erfassbaren Farben. Innerhalb dieser Körper befinden sich die kleineren von technischen Geräten (z.B. Bildschirmen) darstellbaren Farbräume. Auf den Videobereich bezogen, ist es von großer Bedeutung, dass Kamera und in der Farbkorrektur verwendete Monitore im gleichen Farbraum arbeiten. Für eine realitätsnahe Darstellung nach der Distribution müssen allerdings auch die Monitore, bzw. Projektoren, über die Bilder letzten Endes ausgegeben werden, ebenso in dem ursprünglich verwendeten Farbraum arbeiten. (siehe Kapitel 8) Ist dieser Punkt nicht erfüllt, kommt es zu Verschiebungen von Farbvalenzen, die den Bildeindruck maßgeblich verfälschen.

3.2 Die Kontrastwahrnehmung

Die Wahrnehmung von Kontrasten bildet die Grundlage für das Erkennen von Kanten und Konturen in einem Bild. Kontraste sind dabei räumliche Variationen in den Helligkeiten im visuellen Feld - im Extremfall Helligkeitssprünge.²¹ Interessant für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des visuellen Systems ist die Größe der minimal detektierbaren Helligkeitsunterschiede. Solche Unterschiede lassen sich mit Hilfe von Streifenmustern messen. Dabei unterscheidet man zwischen örtlicher und zeitlicher Kontrastsensitivität. Die örtliche Sensitivität erreicht bei Erwachsenen ihr Maximum bei zwei bis drei Perioden pro Grad Sehwinkel.²² Die zeitliche Kontrastwahrnehmung erreicht ihr Maximum bei etwa 8Hz.

²¹ vgl. Hagendorf 2011, S. 72

²² vgl. Hagendorf 2011, S. 73

Hingegen sinkt sie bei 50Hz auf nahezu Null. Hierin liegt der Grund dafür, dass Videobilder mit eben dieser Frequenz nicht mehr als flackernd wahrgenommen werden.

3.3 Die örtliche Auflösung

Bei der Frage nach dem Auflösungsvermögen des Menschen beim Betrachten von Videoinhalten befindet man sich an der Schnittstelle zwischen Biologie und Technik. Hier besteht Notwendigkeit der Klärung, um technische Parameter sinnvoll beurteilen zu können. Die pauschale Aussage, die beispielsweise Benny Bing vom Georgia Institute of Technology trifft, dass die Auflösung des menschlichen Auges 126 Mio. Bildpunkten entspreche, ist daher ebenso unkorrekt, wie die daraus formulierte Folgerung, dass UHD-2 mit 33 Mio. Pixeln pro Bild diese immer noch unterschreite.²³ Das Auflösungsvermögen hängt von der Beugung der Lichtstrahlen am abbildenden Linsensystem und der räumlichen Dichte der Sehzellen ab.²⁴ Die Winkelauflösung wird mit folgender Formel nach Abbe berechnet:²⁵

$$\alpha_{min} = \arcsin\left(1,22 \frac{\lambda}{d}\right)$$

Der Pupillendurchmesser d liegt, wie bereits erwähnt, zwischen zwei und acht Millimetern.²⁶ In der Beispielberechnung wird von einer Pupillenöffnung von zwei Millimetern (Betrachtung einer sehr hellen Umgebung) ausgegangen. Bei einer maximalen Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von etwa 555 nm ergibt sich ein Winkel $\alpha_{min} = 0,016^\circ$. Dieser Wert wird im Kapitel 5.1 wieder aufgegriffen, wenn es um den Zusammenhang von Auflösung einer Projektionsfläche und optimalem Betrachtungsabstand geht.

Nur mit dem Grundlagenwissen über die Art und Weise der menschlichen Wahrnehmung lässt sich später beurteilen, welches Potential zur Verbesserung der Bildqualität überhaupt besteht und ob die definierten Parameter von UHD dieses ausschöpfen, darunter bleiben oder es unter Umständen sogar übersteigen. Dieser Zusammenhang ist wichtig, wenn eine Diskussion über mögliche Anwendungsgebiete von UHD geführt werden soll, da vom

²³ vgl. Bing 2010, S. 3

²⁴ vgl.: Ehrmann, S. 137

²⁵ vgl. ebenda

²⁶ vgl.: <http://www.spektrum.de/lexikon/optik/pupille/2698>, Abruf am 1. 7. 2015

durchschnittlichen Menschen nicht wahrnehmbare Bildparameter keinen Mehrwert für den Betrachter bringen.

4 Überblick über bisherige Videostandards

Bevor auf diese Verbesserungen im Zuge von UHD eingegangen wird, erscheint es an dieser Stelle sinnvoll, die bisherigen Videostandards zusammenfassend zu beschreiben. Wichtig dabei ist zu begreifen, wodurch ein Videosignal definiert wird. Im Folgenden sind deshalb die technischen Parameter anhand der bisherigen Videostandards aufgezeigt, um zu erklären, wie sich die Datenrate eines Videostroms ergibt und welche Kompressionsmöglichkeiten bestehen. Außerdem sind in der zurückliegenden Umstellung von SD-Video zu HD-Video Parallelen zu erkennen zum Übergang von HD zu UHD, die eine Prognosen erleichtern können.

4.1 SD - Standard Definition Video

Beim digitalen Video wird ein zeit- und wertkontinuierliche Signal in ein Pixelraster aus konkreten Amplitudenwerten umgewandelt. Man spricht auch von Quantisierung. Die unendliche Anzahl analoger Signalwerte wird damit auf eine begrenzte Menge ganzer Zahlen reduziert.²⁷ Hinsichtlich der digitalen Signalform unterscheidet man bei Videosignalen RGB, Digital Component und Digital Composite, wobei letzteres aufgrund seiner schmalbandigen Farbübertragung und der PAL-Artefakte heute kaum noch eine Bedeutung hat.²⁸ Bei RGB-Signalen werden die drei Farbkanäle Rot, Grün und Blau separat übertragen. Angewandt wird das Verfahren vor allem innerhalb der Postproduktion von Videofilmen, die mit einer intensiven Nachbearbeitung verbunden ist. Dabei liegt das aufgenommene Signal nativ vor und es besteht der größte Spielraum für nachträgliche Verschiebungen im Farbraum (im Zuge einer Farbkorrektur). Als Auslieferungsformat im Videobereich sind Digital Component-Signale weit verbreitet. Diese bestehen aus einem Luminanzkanal²⁹ Y , sowie den beiden Farbdifferenzkanälen C_B und C_R .

²⁷ vgl.: Schmidt 2005, S. 96, Abs.1

²⁸ vgl.: Schmidt 2005, S. 112

²⁹ Helligkeit

Dabei existiert eine Analogie zum analogen PAL-Verfahren, bei dem neben dem Y-Kanal, die beiden Farbträger U und V verwendet werden. Ursprünglich verfolgte diese Kanalaufteilung das Ziel, dass PAL-Farbsignale auch von reinen Schwarz-Weiß-Empfängern verarbeitet werden konnten und damit voll abwärtskompatibel waren. Schwarz-Weiß-Empfänger verarbeiteten nur das Y-Signal, die beiden Farbvektoren U und V wurden nur von Farbpfängern verwendet. Die Notwendigkeit der Abwärtskompatibilität besteht zwar nicht mehr zwingend, da die Anzahl der eingesetzten Schwarz-Weiß-Empfänger mittlerweile sehr überschaubar sein dürfte. Allerdings bringt die Aufspaltung des Videosignals in die Kanäle Y, C_B und C_R auch Vorteile für die Datenkompression, auf die im Kapitel 4.2 noch eingegangen wird. Bei der Definition der Faktoren für R, G und B wird den Erkenntnissen der menschlichen Wahrnehmung Rechnung getragen (siehe Abbildung 8). Normiert man die drei Empfindlichkeiten, so erhält man für die für SD verwendeten Faktoren zur Darstellung der Luminanz.

Rot: 0,47

Normiert:

Grün: 0,92

$$Y = 0,3 R + 0,59 G + 0,11 B$$

Blau: 0,17

Für die Chrominanzkanäle ergeben sich dadurch für das Digital Composite- Signal folgende Faktoren:

$$C_B = 0,56 (B-Y)$$

$$C_R = 0,71 (R-Y)$$

Die Zahl der Pixel pro Sekunde bei SD-Video beträgt 13,5 Millionen und die sich bei einer 10Bit-Quantisierung ergebende Datenrate 270Mbit/s nach ITU 656.³⁰ Dieser Sachverhalt ist in einer kurzen Nebenrechnung dargestellt.

1 Einzelvollbild besteht aus 625 Zeilen	
25 Einzelvollbilder (15 625 Zeilen) werden pro Sekunde übertragen	
1 Zeile enthält 1728 Worte (864 Worte Y-Signal, 432 Worte C _R , 432 Worte C _B)	
27 Mio Worte/Sekunde	
8 Bit Wortlänge	10 Bit Wortlänge
216Mbit/s	270Mbit/s

Berechnung der Datenrate von SD-Component-Signalen (4:2:2)

Innerhalb eines TV-Produktionshauses arbeitet man mit 10Bit-Signalen bei SD. Die Datenrate des letztendlich an den Konsumenten verteilten Signals liegt deutlich unterhalb dieses

³⁰ vgl. Eustachi 2009

Wertes. Zum Vergleich: Das heute über Satellit ausgestrahlte ARD-HD-Programm³¹ wird beispielsweise mit einer Datenrate von 12,5 Mbit/s übertragen. Solche Werte sind nur durch effiziente Kompressionsverfahren erreichbar, auf die noch näher eingegangen wird. Weiterhin lassen sich digitale Signale zeitlich umsortiert übertragen, was eine optimalere Anpassung an den Übertragungskanal, bzw. das Medium zulässt.

4.2 Grundverfahren der Datenkompression bei Video

Um die Datenrate von Videos zu reduzieren, macht man sich das Vorhandensein von Redundanzen zunutze. Redundanzen sind überflüssige Informationen. Innerhalb eines Einzelbildes (intra-frame) führt diese Art der Datenreduktion nur zu geringen Kompressionsfaktoren.³² Über mehrere Einzelbilder hinweg (inter-frame) sind jedoch höhere Kompressionsfaktoren erreichbar, da sich aufeinander folgende Einzelbilder bei Video inhaltlich oft sehr ähnlich sind.

Ein weiteres bei Video angewandtes Kompressionsverfahren stellt die Irrelevanzreduktion dar. Irrelevanzen sind Signalanteile, die für den Empfänger keinerlei Bedeutung haben, da sie für ihn nicht wahrnehmbar sind.³³ Dabei nutzt man die Grenzen des menschlichen Sehsinns aus. Ein bedeutendes Beispiel für Irrelevanzreduktion ist die sogenannte Farbunterabtastung. Typische Varianten sind 4:2:2, 4:2:0 und 4:1:1. Eine vollständige Abtastung von 4:4:4 wird nur dann benutzt, wenn eine aufwendige Nachbearbeitung vorgesehen ist. Im SD- Bereich bezeichnen diese Ziffern das Vielfache der Abtastfrequenz von 3,375MHz, mit der der jeweilige Kanal quantisiert wird. Die verschiedenen Abtaststrukturen sind in einer Abbildung 11 dargestellt.

Beispiel 4:2:2-Abtasstruktur: Y-Kanal mit 13,5MHz (= 4 x 3,375MHz)
 C_b - und C_r - Kanal mit jeweils 6,75MHz (= 2 x 3,375MHz)

³¹ über DVB-S2 mit MPEG4-H.264-Codec

³² vgl.: Reimers 2008, S. 67

³³ vgl. IT-Wissen.info: <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Irrelevanz-irrelevance.html>, Abruf im Oktober 2015

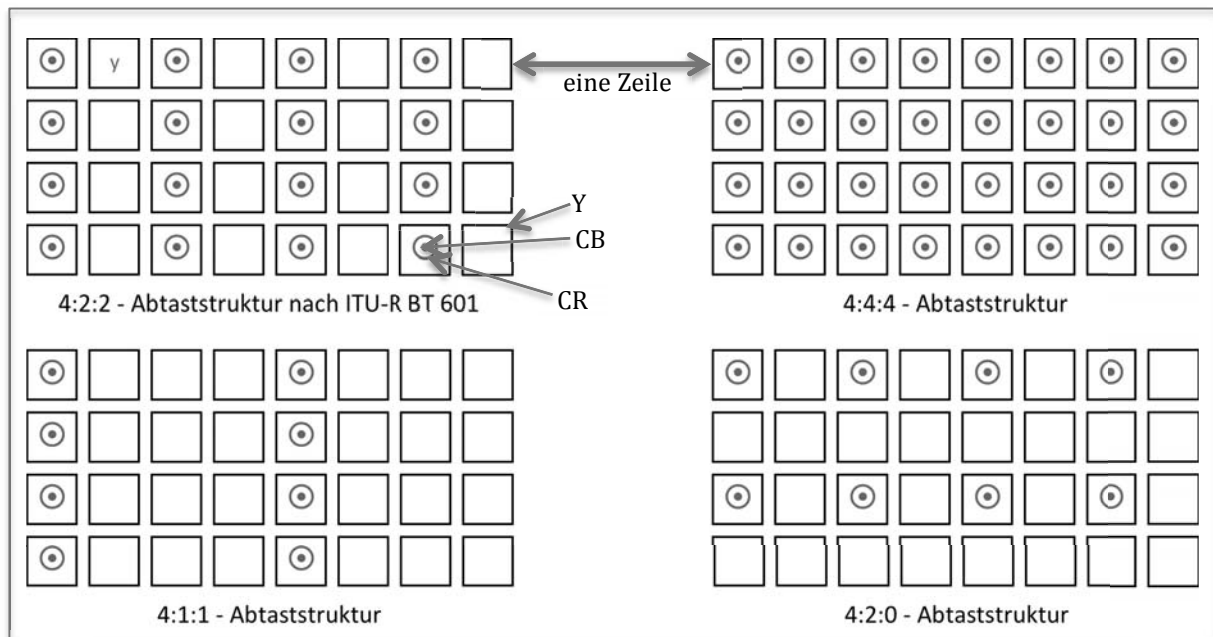


Abb. 10: Abtaststrukturen im Vergleich³⁴

Dabei wird der Luminanzkanal voll aufgelöst übertragen, die beiden Chrominanzkanäle C_B und C_R mit jeweils verminderter Auflösung. Hierbei macht man sich zunutze, dass der Mensch aufgrund seiner biologischen Restriktionen (siehe Kapitel 3) weniger sensibel auf Farbunterschiede reagiert als auf Helligkeitsunterschiede. Gegenüber einem subjektiv vergleichbaren Analogbild sinkt der Bandbreitenbedarf des digitalen Bildes durch diese Kompressionsmethode deutlich. Hier kommt darüberhinaus der bereits angesprochene Vorteil des digitalen Komponentensignals zum Tragen, da neben einem reinen Luminanzkanal zwei Farbdifferenzkanäle vorliegen. Diese besitzen die Eigenschaft, dass sie weniger Details enthalten und recht kontrastarm sind. Damit erfüllen sie ideale Voraussetzungen für eine Redundanzreduktion. Um die Datenrate weiter zu reduzieren, kommen weitere Kompressionsmethoden zum Einsatz. Das verbreitetste Verfahren ist das in verschiedenen Versionen existierende MPEG.

4.3 MPEG-2-Videokompression

MPEG steht für Moving Pictures Expert Group und bezeichnet ein seit 1988 bestehendes Gremium internationaler Experten, die sich mit Verfahren der Datenreduktion von Bewegtbildern beschäftigen. In die erarbeiteten Standards werden auch Audio- und Metadaten miteinbezogen. Seinen Anfang nahm das Ganze mit MPEG-1, das zunächst auf

³⁴ vgl.: Schmidt 2005, S. 118, Abb. 3.25

sehr kleine Datenraten von 1,5Mbit/s bei verhältnismäßig schlechter Videoqualität zielte.³⁵ Der für SD festgelegte Standard trägt die Bezeichnung MPEG-2. Mit Hilfe dessen werden die Videodatenraten von 270Mbit/s (siehe Kapitel 3.1) auf 15 Mbit/s reduziert mit dem „Main Profile at Main Level“, wobei für eine visuell mit PAL vergleichbare Qualität nur ca. 6Mbit/s erforderlich sind. Der MPEG-2-Kompression liegt dabei die schon erwähnte Annahme zugrunde, dass aufeinanderfolgende Einzelbilder eines Videos eine hohe Ähnlichkeit besitzen (Irrelevanzen), die nicht immer vollständig übertragen werden müssen. Im Encoder wird dazu das Signal und die Zeit τ (Dauer eines Einzelbildes) verzögert und vom aktuellen Signal subtrahiert. Bei hohen Korrelationen in Folgebildern ist die Differenz gering und kann mit weniger Bits codiert werden, als dies mit einem einzelnen Bild möglich wäre. Diese Redundanzreduktion an sich ist nicht verlustbehaftet. Erst die Limitierung durch Quantisierungsstufen führt zu einem Verlust an Informationen.

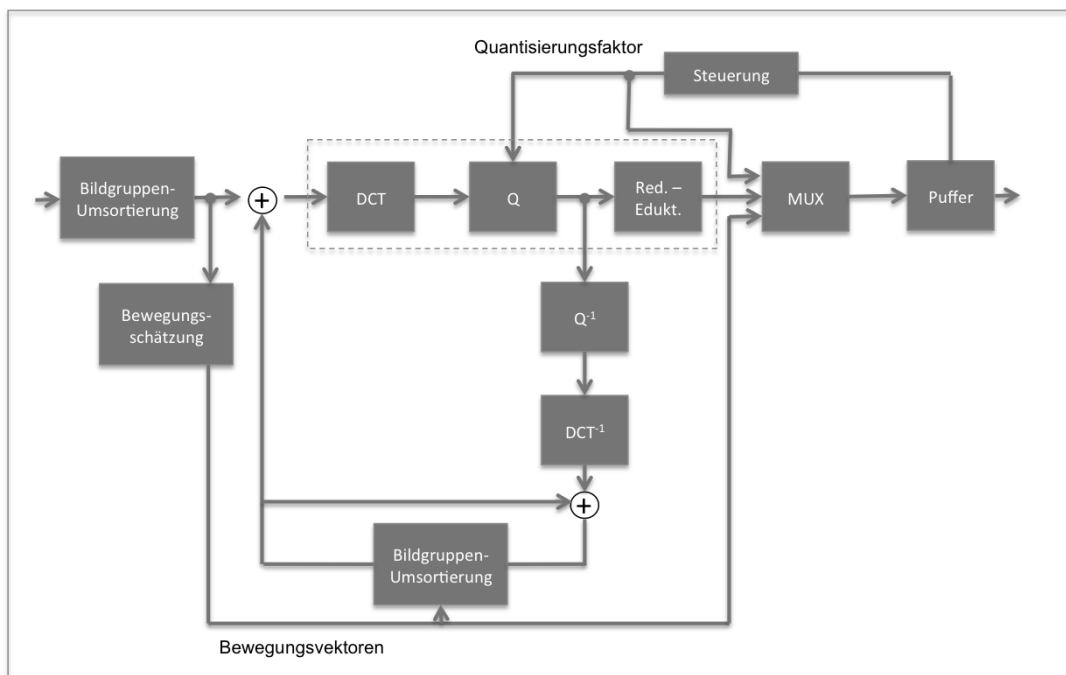


Abb. 11: Blockschaltbild eines MPEG-Encoders³⁶

Im Blockschaltbild ist der Signalweg durch einen MPEG-Video-Encoder dargestellt. Dabei findet zunächst eine Bildgruppenumsortierung mit anschließender Bewegungsschätzung statt. Der Bereich im gestrichelten Kästchen beschreibt hier die Intra-Frame-Prädiktion, die so auch bei JPEG Anwendung findet. Das beinhaltet die diskrete Cosinustransformation

³⁵ vgl. ebenda, S. 152, Abs. 2

³⁶ vgl. Reimers 2008, S.85

(DCT), die Quantisierung und die Redundanzreduktion. Im Unterschied zu JPEG findet die bereits angesprochene Redundanzreduktion über mehrere Einzelbilder hinweg (inter-frame) statt. Zusätzlich zur Bildspeicherung und Differenzbildung findet eine Bewegungseinschätzung statt, mit Hilfe derer einzelne Blöcke in den Bildfolgen verglichen und einander zugeordnet werden. Die sich ergebenden Bewegungsvektoren werden mit in den Datenstrom aufgenommen, da sie auf Decoderseite zur Wiederherstellung des Bildes benötigt werden.

Damit eine bidirektionale Prädiktion möglich wird, ist es erforderlich, dass die Bilder vor der Übertragung umsortiert werden. Das bedeutet, dass die Betrachtungsreihenfolge nicht der Übertragungsreihenfolge entspricht. Für den Decoder ist es notwendig, einen Anfangspunkt zu erkennen, an dem er ansetzen kann. Deshalb dürfen nicht alle Bilder voneinander abhängig sein. Man unterscheidet bei MPEG drei Arten von Bildern. Es gibt intra-frame-prädizierte I-Bilder, unidirektional prädizierte P-Bilder und bidirektional prädizierte B-Bilder.

Betrachtungsreihenfolge: $I_1 - B_2 - B_3 - P_4 - B_5 - B_6 - P_7 - B_8 - B_9 - P_{10} - B_{11} - B_{12} - I_{13} - \dots$
Übertragungsreihenfolge: $I_1 - P_4 - B_2 - B_3 - P_7 - B_5 - B_6 - P_{10} - B_8 - B_9 - I_{13} - B_{11} - B_{12} - \dots$

Die Bildergruppe zwischen zwei aufeinanderfolgenden I-Bildern (hier im Beispiel 12) bezeichnet man als „Group of Pictures“. Bei dem hier aufgeführten Beispiel bräuchte der Decoder maximal eine halbe Sekunde (z.B. nach Senderwechsel im TV), bis ihn das erste I-Bild erreicht und er davon ausgehend mit der Decodierung beginnen kann.

Eine große Verbesserung von MPEG-2 gegenüber dem Vorgänger MPEG-1 ist die sogenannte SNR-Scalability³⁷, und die Spatial-Scalability³⁸. Bei der SNR-Skalierbarkeit handelt es sich um eine Methode zur dynamischen Anpassung des Signalrauschabstandes an die Signalstärke im Empfänger (Encoder). Nach der Quantisierung werden die Koeffizienten der diskreten Cosinus-Transformation in höherwertige (Base-Layer) und niederwertige (Enhancement-

³⁷ aus Englischem: Signal-Rauschabstand-Skalierbarkeit

³⁸ aus Englischem: Orts-Skalierbarkeit

Layer) eingeteilt.³⁹ Bei einer Reduzierung der verfügbaren Kanalbandbreite soll somit erreicht werden, dass die mit einem höheren Fehlerschutz versehenen wichtigen Bits des Base-Layers übertragen werden. Es kommt folglich nicht zu einem Totalausfall des Videosignals, sondern nur zu sichtbaren Quantisierungsfehlern (z.B. Blockbildung). Beim Spatial- Scalability wird das Signal zunächst in einem Viertel der eigentlichen örtlichen Auflösung quantisiert und daraus ein Base-Layer mit hohem Fehlerschutz gebildet. Bei einem Einbruch der Bandbreite auf dem Übertragungskanal kommt es zu einer Reduktion der Auflösung. Beide Skalierbarkeiten sind in MPEG-2 definiert und bieten die Möglichkeit eines mehrstufigen Fehlerschutzes.⁴⁰

Ein digitales SD-Videosignal nach ITU-R BT. 601 liegt qualitativ weit unter analogem 16mm-Film⁴¹, der für hochwertige TV-Produktionen genutzt wurde. Dieser Faktor wird noch einmal verstärkt durch das aktuell zum Teil in der Fernsehtechnik noch verwendete Zeilensprungverfahren, das die vertikale Auflösung noch einmal halbiert. Wenn die TV-Geräte zunehmend größer werden bei gleichbleibendem Betrachtungsabstand, werden im Bild einzelne Pixel für den Betrachter erkennbar. Das menschliche Auflösungsvermögen übersteigt dann die Auflösung des betrachteten Abbildes. Dieser Umstand veranlasste zur Einführung eines verbesserten Videostandards.

4.4 HD - High Definition Video

Die aufgeführten Limitierungen führten zur Einführung von digitalem HD-TV. 2004 nahm EURO-1080 als internationaler Sender den Betrieb auf. Zuvor hatte es bereits in den 90er-Jahren erfolglose Bestrebungen gegeben, analoges HD einzuführen.⁴² Erst die Digitaltechnik verhalf dem Standard zum Durchbruch. HD bot den Vorteil der internationalen Verwertbarkeit, der bis dato nur dem analogen Film vorbehalten war. HD-Videos ließen sogar eine Auswertung im Kino zu. Man nutzte eine internationale Großveranstaltung, um die ersten HD-Bilder weltweit live zu verbreiten. 2006 war es die Fußballweltmeisterschaft in Deutschland, die als Plattform diente. Ziel der Marketingmaßnahme war es, die Begeisterung für die neue Technologie zu wecken und damit den Konsum neuer Endgeräte

³⁹ vgl. Reimers 2008, S. 99

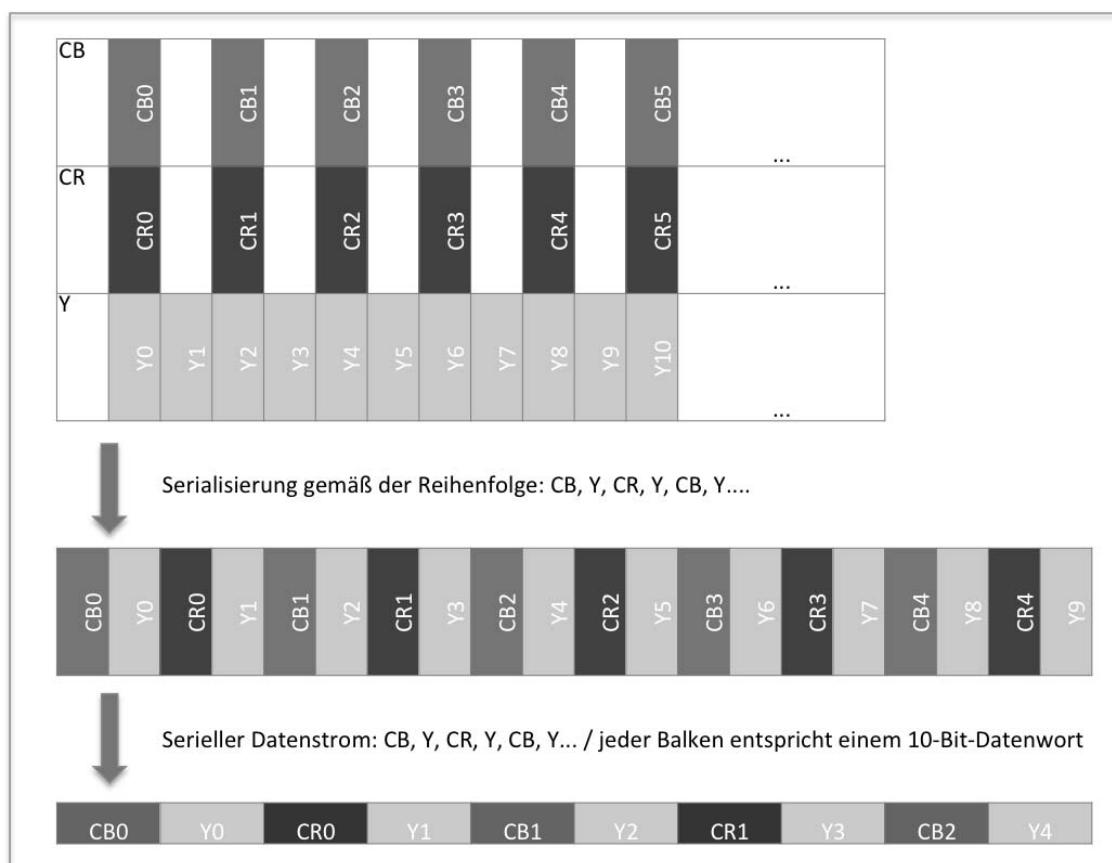
⁴⁰ vgl. Reimers 2008, S. 99

⁴¹ vgl. Schmidt 2008, S. 258

⁴² Schmidt 2008, S. 126, Abs. 1

anzukurbeln. Im Gegensatz zur Umstellung von Schwarzweiß- auf Farbfernsehen und analogem PAL auf digitales SD⁴³, erforderte HDTV neue Endgeräte beim Endkunden. Auch für die Sender bedeutete die Umstellung von SD auf HD sehr hohe Investitionen, da Produktionsinfrastrukturen komplett erneuert werden mussten. Einige Sendeanstalten haben bis heute noch nicht vollständig auf HD umgestellt. So baut der Saarländische Rundfunk sein Funkhaus in diesem Jahr 2016 erst auf HD um. Auch werden einzelne Sendungen, wie zum Beispiel das *Heute-Journal* im ZDF weiterhin in SD produziert und erst auf dem HD-Sendeweg hochskaliert. Diese Fakten sollte man kennen, bevor man über eine bevorstehende Einführung von UHD TV spekuliert.

Zur Übertragung des HD-Signals wird der parallele Datenstrom in einen seriellen konvertiert, über einen NRZI-Code kanalcodiert und nach einem Algorithmus zerwürfelt. Ziel dessen ist die Gleichstromfreiheit des Signals zur Rückgewinnung des Taktes, sowie die Möglichkeit der Fehlerkorrektur.



⁴³ ein günstiger Digitalreceiver war ausreichend, um einen analogen TV weiter zu betreiben

Neben dem Videobild enthält der Datenstrom auch Audio und zusätzliche Daten wie beispielsweise Untertitel. Für HD stehen 16 Tonkanäle zur Verfügung. Der serielle Datenstrom wird wie bei SD schon im professionellen Bereich zumeist über 75Ω-Koaxialkabel geführt. Die Datenrate beträgt bei HD-Video ca. 1,5 Gbit/s. Die Norm unter der HDTV definiert ist, lautet ITU-R 709. Bis heute ist sie die verbreitetste Norm im Videobereich, obwohl sie mittlerweile an vielen Stellen mögliche Bildverbesserungen hemmt, wie die Arbeit noch zeigen wird. An dieser Norm werden wesentliche Teile der Broadcast-Infrastruktur ausgerichtet. Aus diesem Grund soll an hier näher auf die technischen Parameter, die sich hinter ihr verbergen, eingegangen werden.

Durch die Verwendung anderer Chromakordinaten bei HDTV-Displays gegenüber SD-Displays, werden andere Faktoren zur Luminanzsignalbildung verwendet, die in Abbildung 13 im Vergleich gegenübergestellt sind. Grund dafür sind die neueren Displaytypen, die Röhrenmonitore ersetzen.

Faktoren der Luminanzsignalbildung HD	Faktoren der Luminanzsignalbildung SD
$Y = 0,213 R + 0,715 G + 0,072 B$	$Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B$
$C_R = 0,635 (R - Y)$	$C_R = 0,71 (R-Y)$
$C_B = 0,548 (B - Y)$	$C_B = 0,56 (B-Y)$

Abb. 13: Vergleich der Luminanzvektoren von ITU-R 709 und ITU-R BT656

Die Abtastrate für das Luminanzsignal beträgt 74,25MHz, für die beiden Farbdifferenzen jeweils die Hälfte. Als Quantisierungsstufen kommen wie bei SD schon, 8 und 10 Bit infrage. Die Übertragung des Signals erfolgt im Zeitmultiplex.⁴⁵ Die Netto-Datenrate eines 10Bit-HDTV-Videosignals beträgt 1,4 Gbit/s .

$2640 \times 1125 \times 10\text{Bit} \times 2 \text{ (Komponentensignale einbezogen)} \times 25 \text{ (Bilder/s)} = 1,383 \text{ Gbit/s}$

Formel 1: Formel 1: Ermittlung der Nettodatenrate eines HDTV-Videosignals

Diese Datenrate ist dabei im genormten HD-Signal unabhängig von der Bildrate⁴⁶. Dieser Umstand ergibt sich daraus, dass für die unterschiedlichen HD-Formate jeweils

⁴⁴ vgl. Kompendium HD-Grundlagen 2012

⁴⁵ Reihenfolge: CB, Y, CR,Y,CB,

⁴⁶ auch Framerate

unterschiedliche Anzahlen an Bruttozeilen und Bruttopixeln pro Zeile verwendet werden (Siehe Tabelle 1). Hieraus ergibt sich, dass die Datenrate nicht von dem verwendeten HD-Format nach ITU-R BT 709 abhängig ist. Dieser gemeinsame Standard wird als Common Image Format (CIF) bezeichnet und wird durch eine variable, von der Bildrate abhängige Austastlücke realisiert. Damit haben HDTV-Signale in den USA mit 30, bzw. 60 Hz Bildrate die gleiche Datenrate wie in Europa, wo 25, bzw. 50Hz Bildrate definiert sind.

HD-Format	Nettozeilen	Bruttozeilen	Nettopixel/Zeile	Bruttopixel/Zeile
1080p24	1080	1125	1920	2750
1080i50	1080	1125	1920	2640
1080p25	1080	1125	1920	2640
1080i60	1080	1125	1920	2200
1080p30	1080	1125	1920	2200
720p50	720	750	1280	1980

Tabelle 1: Common Image Format - Übersicht

Diese angeführten Formate beinhalten allerdings kein 1080p50, bzw. 1080p60, also die progressive Abtastung mit 50, bzw. 60 voll aufgelösten HD-Bildern pro Sekunde. Gegenwärtig ist man bei einer Übertragung von HDTV in Deutschland auf 50Hz festgelegt und kann das entweder progressiv in der verminderten Auflösung 720p realisieren oder aber im Zeilensprungverfahren (interlaced) mit 1080i. Beides existiert bis heute nebeneinander. So sendet das ZDF seinen HD-Feed beispielsweise im Format 720p, während Sky Deutschland momentan mit 1080i ausgestrahlt wird. Eine Verbesserung dieses Umstandes wäre ein HD-Videosignal, das sowohl zeitlich, als auch örtlich die höhere HD-Auflösung beinhaltet. So zum Beispiel der Form 1080p50. Die Datenrate eines solchen Signals mit 10Bit quantisiert beträgt 2,77Gbit/s. Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass auch ohne weitere Erhöhung der örtlichen Auflösung, wie sie im Zuge von UHD angestrebt wird, so durchaus objektive Verbesserungen der Bildqualität gegenüber dem heutigen HDTV-Standard möglich sind. Dieser Umstand führt zu der Frage, ob es für die subjektive Qualität von Video wichtiger sei, die Auflösung im Zuge des UHD-Standards zu erhöhen oder zunächst die Vollbildrate von 50Hz bei voller HD-Auflösung durchzusetzen?

4.5 Verbesserungen der Datenkompression durch MPEG-4 (H.264)

Bei den im Kapitel 4.4 betrachteten Signalen handelt es sich analog zu SD um Produktionsformate. Zur Auswertung, bzw. Übertragung findet auch hier zwangsläufig eine

Kompression statt. Wie bei SD bedient man sich dazu der MPEG-Kompression. Im Fall von HD des neueren Standards MPEG-4-AVC⁴⁷ (H.264), der in allen Schritten der Codierung Verbesserungen gegenüber MPEG-2 mit sich bringt. Eigentlich hätte MPEG-3 eine HD-Implementierung bekommen sollen, allerdings wurde das im Nachhinein bereits in MPEG-2 definiert, so dass die Arbeit nicht weiterverfolgt wurde und direkt MPEG-4 nachfolgte. Alle europäischen Set-Top-Boxen, die ein HD-TV-Logo verwenden, müssen einen H.264-Decoder besitzen.⁴⁸ Wesentlichste Veränderungen in Bezug zu MPEG-2 ist die Verminderung der Datenrate um bis zu 50% bei gleicher Bildqualität. Diese Effizienzsteigerung wird durch ein Verfahren erreicht, dass sich Advanced Coding Efficiency (ACE) nennt. Ist die Genauigkeit der Bewegungskompensation bei MPEG-2 aufgrund des Rechenaufwandes auf ein halbes Pixel beschränkt, so erhöht sie sich bei H.264 aufgrund von ACE und dessen ausgefeilte Interpolationsfiltermethoden auf ein Viertel Pixel⁴⁹. Weiterhin wird die diskrete Cosinustransformation durch eine Integer-Transformation ersetzt. Damit verzichtet MPEG-4 auf Fließkommaoperatoren, die zu Ungenauigkeiten im Decoder führen. Die Größe der Makroblöcke ist auf 4x4 Pixel reduziert, was Blockfehler weniger stark in Erscheinung treten lässt. Die gegenüber MPEG-2 höhere Anzahl an Bewegungsvektoren wird in Form von Differenzen abgespeichert. Bezüglich der Referenzbilder (I-Frames) unterscheidet man zwischen Short-Term- und Long-Term-Referenzbildern. Erstere bleiben so lange im Speicher, bis eine bestimmte Anzahl von Bildern erreicht ist. Letztere verbleiben, bis sie explizit gelöscht werden. Sie stehen auch solange für eine spätere Prädiktion zur Verfügung. Wie auch bei MPEG-2 wurden in MPEG-4 verschiedene Profile und Ebenen⁵⁰ definiert. In der Tabelle unten ist zu erkennen, dass die Datenrate im Baseline-Profile (4:2:0-Farbabtastung) 14-20Mbit/s beträgt. Das entspricht der Datenrate, die Sender über Satellit in DVB-S2 derzeit nutzen. MPEG-4 wird aber längst nicht nur für Distributionszwecke genutzt. Die höherwertigen Profile bis hin zu High 4:4:4 ohne Chroma-Subsampling finden mittlerweile auch innerhalb der Videoproduktion Anwendung. Bei HD liegt die Datenrate eines 1080p50-Signals in MPEG-4 High Profile 4:4:4 etwas unter 200Mbit/s. Das vergleichbare unkomprimierte HD-Produktionssignal liegt, wie bereits errechnet, bei etwas unter 3Gbit/s.

⁴⁷ exakte Bezeichnung: ITU-T Rec. H.264

⁴⁸ vgl. Reimers 2007, S. 102

⁴⁹ vgl. Schmidt 2005, S. 168, Abs. 2

⁵⁰ engl. Layer

Diese Reduktion der Datenrate ohne sichtbaren Qualitätsverlust (High 4:4:4-Profil) verdeutlicht, weshalb mittlerweile selbst zahlreiche professionelle Kameras direkt in MPEG-4 aufzeichnen.

Macroblocks pro			Beispiele für Auflösung/Bildrate dieses Levels	Videobitrate (VCL) für Profiles			
Level	Frame	Sekunde		Baseline Extended Main	High	High 10	High 4:2:2 High 4:4:4
1	99	1 485	128 × 96 / 30 176 × 144 / 15	64 kbit/s	80 kbit/s	192 kbit/s	256 kbit/s
1b				128 kbit/s	160 kbit/s	384 kbit/s	512 kbit/s
1,1	396	3 000	176 × 144 / 30 320 × 240 / 10 352 × 288 / 7.5	192 kbit/s	240 kbit/s	576 kbit/s	768 kbit/s
1,2		6 000	176 × 144 / 60 320 × 240 / 20 352 × 288 / 15	384 kbit/s	480 kbit/s	1152 kbit/s	1536 kbit/s
1,3		11 880	320 × 240 / 40	768 kbit/s	960 kbit/s	2304 kbit/s	3072 kbit/s
2			352 × 288 / 30	2 Mbit/s	2,5 Mbit/s	6 Mbit/s	8 Mbit/s
2,1	792	19 800	352 × 288 / 50 352 × 576 / 25	4 Mbit/s	5 Mbit/s	12 Mbit/s	16 Mbit/s
2,2	1620	20 250	352 × 288 / 50 720 × 480 / 15	4 Mbit/s	5 Mbit/s	12 Mbit/s	16 Mbit/s
3		40 500	720 × 480 / 30 720 × 576 / 25	10 Mbit/s	12,5 Mbit/s	30 Mbit/s	40 Mbit/s
3,1	3 600	108 000	720 × 576 / 60 1280 × 720 / 30	14 Mbit/s	17,5 Mbit/s	42 Mbit/s	56 Mbit/s
3,2	5 120	216 000	1280 × 720 / 60 1280 × 1024 / 42.2	20 Mbit/s	25 Mbit/s	60 Mbit/s	80 Mbit/s
4	8 192	245 760	1280 × 720 / 68.3 1280 × 1024 / 48 1920 × 1080 / 30	20 Mbit/s	25 Mbit/s	60 Mbit/s	80 Mbit/s
4,1				50 Mbit/s	62,5 Mbit/s	150 Mbit/s	200 Mbit/s
4,2	8 704	522 240	1280 × 720 / 145 1920 × 1080 / 64 2048 × 1080 / 60	50 Mbit/s	62,5 Mbit/s	150 Mbit/s	200 Mbit/s
5	22 080	589 824	1920 × 1080 / 72.3 3672 × 1536 / 26.7 2048 × 1080 / 67.8	135 Mbit/s	168,75 Mbit/s	405 Mbit/s	540 Mbit/s
5,1	36 864	983 040	2048 × 1080 / 112.9 4096 × 2160 / 28.5 3840 × 2160 / 31.7	240 Mbit/s	300 Mbit/s	720 Mbit/s	960 Mbit/s
5,2	36 864	2 073 600	2048 × 1080 / 172 3840 × 2160 / 66.8 4096 × 2160 / 60	240 Mbit/s	300 Mbit/s	720 Mbit/s	960 Mbit/s

Tabelle 2: MPEG-4-Profile und –Ebenen im Überblick

4.6 Der HD-Farbraum Rec.709

Ein weiteres Problem für die Videotechnik besteht darin, dass Farben quantitativ bestimmt werden müssen, um sie zuverlässig zu reproduzieren. Dazu legt man Primärreizkurven fest,

indem man sich den Umstand der Metamerie zu Nutze macht.⁵¹ Metamerie bezeichnet eine Erkenntnis aus der Farbenlehre, die beschreibt, dass gleiche Farbwirkungen durch unterschiedlich zusammengesetzte Lichtspektren erreicht werden können. Da Leuchtstoffe (z.B. eines Monitors) nie reine Spektralfarben aussenden, ist es wichtig, die subjektive Farbwirkung abzugleichen. Um zu gewährleisten, dass ein Videobild farblich der Kameraaufnahme bzw. der im Nachhinein durchgeführten Farbkorrektur entspricht, ist die Einhaltung eines sogenannten Farbraumes entscheidend. Bevor auf den konkreten HD-Farbraum eingegangen wird, soll die Ausführung aus Kapitel 3.1 aufgegriffen werden.

Ein Farbraum ist ein abstraktes dreidimensionales Gebilde, das von den drei Farbvektoren Rot, Grün und Blau aufgespannt wird. Mit Hilfe dieser drei Grundfarben lässt sich additiv ein Großteil der Farben mischen, der von Objekten reflektiert wird, die mit Sonnenlicht bestrahlt werden.⁵² Subjektiv gleich wahrgenommene Farben haben die gleiche Farbvalenz. Die jeweiligen Anteile der Primärvalenzen Rot, Grün und Blau werden als Farbwerte bezeichnet. Sind die Farbwerte aller drei Primärvalenzen gleich, so befindet sich die resultierende Farbvalenz auf der Unbuntgeraden (engl.: Gray scale). Betragen alle drei Intensitäten jeweils 100% , so entspricht das wahrgenommene Resultat Weiß, bei 0% entsprechend Schwarz. Eine Mischung der Farbwerte von zwei Primärvalenzen mit 100% und dem dritten Anteil von 0% ergibt die Komplementärfarben Cyan, Magenta und Gelb. Dieser Sachverhalt lässt sich im abgebildeten Farbwürfel erkennen.

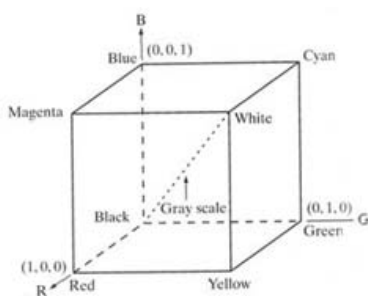


Abb. 14: RGB-Farbwürfel

Eine Farbvalenz im Raum lässt sich eindeutig beschreiben aus der Helligkeit (engl.: luminance) und der Farbart. Die Helligkeit ist durch die Gray Scale definiert. Die Farbart setzt sich aus den beiden Parametern Farbton (engl.: hue) und Sättigung (engl. Saturation)

⁵¹ vgl. ebenda

⁵² vgl. Schmidt 2005, S. 48, Abs. 1

zusammen. Damit lässt sich die Farbart allein durch zwei Dimension beschreiben, die eine Ebene aufspannen. Diese ist ein diagonaler Schnitt durch den RGB-Würfel. Man nennt sie Primärvalenzdreieck. Aus den drei Farbwerten R,G und B bildet man die einzelnen Farbwertanteile r, g und b, die wiederum wie folgt definiert sind:

$$r = R / (R + G + B) \quad g = G / (R + G + B) \quad b = B / (R + G + B)$$

Daraus folgt:

$$r + g + b = 1$$

Damit reichen die Valenzen für r und g als Dimensionen zur eindeutigen Bestimmung des dritten Vektors. In diesem r-g-Koordinatensystem liegen Spektralfarben außerhalb des Dreiecks und können durch Mischung von Primärvalenzen innerhalb des Dreiecks nicht erzeugt werden. Trägt man die Spektralfarben in das r-g-Koordinatensystem ein, so entsteht eine hufeisenartige Kurve um das Dreieck. Um die Darstellung zu vereinfachen und die Spektralfarben mit einzubeziehen, wechselt man vom Primärvalenzsystem (R-G-B) zum Normalvalenzsystem (X-Y-Z) durch eine einfache Koordinatentransformation. Dadurch entfallen negative Anteile. Das entstehende Dreieck umschließt die aus den Spektralfarben gebildete hufeisenförmige Kurve. Analog zum Primärvalenzsystem werden die Normfarbwertanteile x,y und z wie folgt gebildet:

$$x = X / (X + Y + Z) \quad y = Y / (X + Y + Z) \quad z = Z / (X + Y + Z)$$

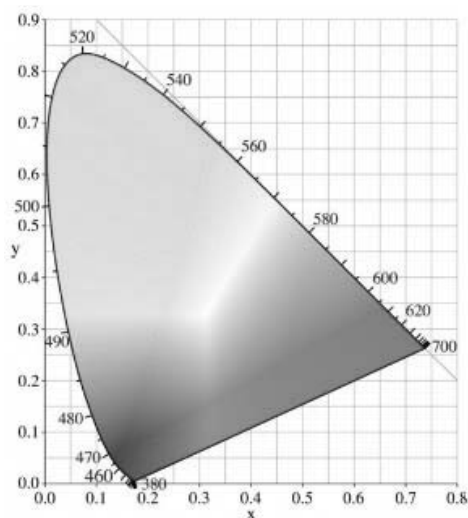


Abb. 15: CIE-Diagramm

Die Normalvalenzen X, Y und Z liegen außerhalb des Spektralfarbenzuges. Sie sind physikalisch nicht realisierbar und werden deshalb als virtuelle Primärvalenzen bezeichnet.⁵³

Für die Videotechnik entscheidend ist, dass der Normfarbwert Y so definiert ist, dass er proportional zur Leuchtdichte ist. Die entsprechende Farbtabelle wurde von der Commission Internationale de l'Éclairage (kurz: CIE) genormt. Dabei hat der Weißpunkt bei Normlicht D65 die Koordinaten $x = y = z = 0,33$. Damit bestimmt der Ort im Spektralfarbenzug den Farbton und der Abstand vom Weißpunkt die Sättigung. Bei der Farbdarstellung eines Displays spielen weniger die allgemeinen Primärvalenzen eine Rolle, als die Primärvalenzen des jeweiligen Monitors, die sich durch die eingesetzten Leuchtstoffe definieren. Diese Leuchtstoffe müssen genormt sein, um eine farbtreue Wiedergabe zu erreichen. In Europa wurde dies durch die EBU zunächst für SD vorgenommen. Die nach EBU genormten Primärvalenzen haben dabei im CIE-xy-Koordinatensystem folgende Koordinaten:

Primärvalenz	x	y
Rot	0,64	0,33
Grün	0,29	0,60
Blau	0,15	0,06
Weiß (D65)	0,31	0,33

Tabelle 3: : Bildschirmprimärvalenzen bei SDTV

Wenn man das Dreieck in das CIE-Diagramm einzeichnet, erkennt man, dass im Grün nur relativ geringe Sättigungen darstellbar sind. Dennoch ist der größte Teil der in der Natur vorkommenden Körperfarben enthalten.⁵⁴ Bei HD haben wir es mit anderen Primärvalenzen zu tun, die in der Tabelle dargestellt sind.

Primärvalenz	X	y
Rot	0,63	0,33
Grün	0,30	0,60
Blau	0,15	0,06

Tabelle 4: Bildschirmprimärvalenzen bei HDTV nach Rec. 709⁵⁵

⁵³ vgl. Schmidt 2005, S. 56, Abs. 2

⁵⁴ vgl. Schmidt, S. 59, Abs. 2

⁵⁵ vgl. BET (<http://www.bet.de/lexikon/primarvalenz/>, Abruf am 1.2.2016)

Die Zusammensetzung der Luminanz ergibt sich durch:

$$Y = 0,213 R + 0,715 G + 0,072 B$$

Der HD-Farbraum ist nur im Bereich von Grün etwas weiter gefasst als bei SD und entspricht dem Farbraum sRGB. Bei der Umstellung von SD auf HD gab es keine signifikanten Verbesserungen der Farbdarstellung. An dieser Stelle verspricht die neue Normierung BT.2020 im Zuge von UHD beachtliche Verbesserungen, wie noch gezeigt wird.

Letztendlich brachte HD im Vergleich zu SD hinsichtlich der Auflösung deutliche Verbesserungen der Bildqualität mit sich. Allerdings besteht noch Spielraum nach oben, was die realitätsnahe Abbildung von Videoinhalten angeht. Zum einen wird Full-HD im Fernsehbereich momentan nur mit 50 Halbbildern übertragen, was nach wie vor eine Halbierung der vertikalen Auflösung bedeutet. Grund dafür ist die begrenzte Übertragungsbandbreite der Sender, auf die im Kapitel 9.1 noch näher eingegangen wird. Auch der Farbraum Rec.709 deckt längst nicht mehr ab, was aktuelle Monitore darstellen könnten. Wenn die Immersion des Zuschauers, also das Gefühl, ein reales Bild auf dem Monitor zu betrachten, als Ziel von digitalem Video im Unterhaltungsbereich gesetzt wird, so erreicht HD dieses Ziel noch nicht. UHD als neuer Videostandard versucht, sich diesem Ziel weiter anzunähern. Allerdings ist eine Umsetzung nicht unproblematisch und kann an einigen Stellen durchaus kritisch hinterfragt werden, wie die folgenden Kapitel aufzuzeigen sollen. Zunächst einmal werden hierfür die als Norm festgelegten Spezifikationen vorgestellt.

5 Die Spezifikationen von Ultra High Definition (UHD)

Bereits im Mai 2012 schlug die internationale Fernmeldeunion ITU⁵⁶ unter Mitwirkung der britischen BBC, der italienischen RAI und NHK aus Japan Parameter für den neuen UHD-Standard vor.⁵⁷ Dieser schließt eine Vielzahl von Bildparametern ein, die unter der Norm BT.2020 festgehalten wurden. Die Norm gilt als erste Empfehlung für die Entwicklung und ist natürlich bislang nicht in Gänze umgesetzt. Sie gibt zunächst nur eine Richtung für die Industrie vor, mit dem Ziel, herstellerübergreifende Standards zu entwickeln. Dass es bei

⁵⁶ International Telecommunication Union

⁵⁷ vgl.: http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2012/31.aspx#.VbeMAULtIHy, Aufruf am 28. Juli 2015

UHD längst nicht nur um die Erhöhung der Auflösung geht , fasst Per Björkmann⁵⁸ mit folgender „Gleichung“ zusammen.

$$UHD = HR + HFR + HDR.^{59}$$

Er vertritt wie viele Experten der ITU die Ansicht, dass eine bloße Erhöhung der Auflösung (HR: high resolution) nicht ausreiche, um einen deutlichen Mehrwert gegenüber einer HD-Distribution zu erzielen. Viel entscheidender sei die Verbesserung weiterer Faktoren, wie die Erhöhung der Bildrate (HFR: high frame rate) und eine Vergrößerung des Dynamikumfangs (HDR: high dynamic range). Nur die Verbesserung aller Parameter führe, so Björkmann, zu einer breiten Akzeptanz von UHD. Im Folgenden soll nicht nur auf die entsprechenden Bildparameter im Einzelnen eingegangen werden. Es soll darüberhinaus gezeigt werden, warum sich gewisse Veränderungen gegenseitig sogar bedingen und damit zu einem exponentiellen Anstieg der entstehenden Datenraten führen können. Das wird besonders deutlich, wenn man den Zusammenhang von örtlicher und zeitlicher Auflösung betrachtet (siehe Kapitel 5.2).

5.1 Die örtliche Auflösung

Die ITU unterscheidet hinsichtlich UHD bisher zwei Standards. Der erste ist als UHD-1 definiert und besitzt eine festgelegte Auflösung von 3840 x 2160 Bildpunkten. Die oft äquivalent verwendete Bezeichnung „4K“ bezieht sich auf die ungefähre horizontale Auflösung von 4000 Bildpunkten. Dabei existiert 4K im Bereich von digitalem Film bereits schon und beschreibt streng genommen eine Auflösung von 4096 x 2160 Bildpunkten, was einem Seitenverhältnis von ungefähr 19:10 entspricht. Aufnahmen in diesem Format sind vorrangig für Kinoprojektionen gedacht. Da im Fernsehbereich aber weiterhin an dem 16:9-Bildseitenverhältnis festgehalten wird, bezeichnet 4K dort meist die 4-fache Auflösung von HD und damit knapp 8 Megapixeln. Auch in der vorliegenden Arbeit wird diese Konvention verwendet.

In der zweiten Stufe von UHD (UHD-2) wird eine Auflösung von „8K“ als nochmalige Verdopplung des Bildes in Höhe und Breite im Vergleich zu 4K definiert. Damit beträgt die

⁵⁸ Head of Distribution von Swedish Television

⁵⁹ vgl.: PER BJÖRKMAN, The Ultra HD equation, EBU-tech-i17.pdf

Auflösung eines 8K-Bildes 7680 x 4320 Pixel und entspricht weiterhin dem Seitenverhältnis von 16:9. Insgesamt ist ein UHD-2-Bild um das 16-Fache höher aufgelöst als ein HD-Bild. In UHD werden nur noch quadratische Pixel vorgesehen. Die Auflösung beträgt hier 32 Megapixel. Dieser Wert liegt im Bereich dessen, was aktuelle hochwertige Fotokameras aufnehmen können.⁶⁰ Wenn ein einzelnes Frame allein bereits so detailliert aufgelöst wird, erklärt sich schnell, dass die Datenrate je nach Framerate exorbitant steigt im Vergleich zu aktuellen HD-Produktionen.

Natürlich stellt sich an dieser Stelle zunächst die Frage, wie diese höheren Auflösungen von den Betrachtern wahrgenommen werden, bzw. welche neuen Möglichkeiten der Bilddarstellung sich eröffnen. Im Kapitel 3.4 erfolgte bereits die Berechnung des menschlichen Auflösungsvermögens nach der Formel von Abbe. Dieser durch ein Winkelmaß ausgedrückte Wert beträgt $\alpha_{min} = 0,016^\circ$. Auf eine Entfernung vom Betrachter zum TV von 2,75m⁶¹ bezogen, bedeutet das eine horizontale Auflösung von etwa 0,77mm. Daraus ergeben sich bei gleich bleibendem Betrachtungsabstand folgende in der Abbildung dargestellten Bildschirmgrößen, bei denen Bildpunkte in der Horizontalen gerade so nicht mehr aufgelöst werden können.

Format	Horizontale Pixel-Anzahl	Bildbreite in cm	Bildhöhe in cm
SD	1024	79	44
HD	1920	141	83
UHD-1 (4K)	3840	296	166
UHD-2 (8K)	7680	591	333

Tabelle 5: Berechnete Bildgröße in Abhängigkeit der Auflösung bei einem angenommenen Betrachtungsabstand von 2,75m

⁶⁰ Stand Dezember 2015

⁶¹ als durchschnittlich angenommener Wert

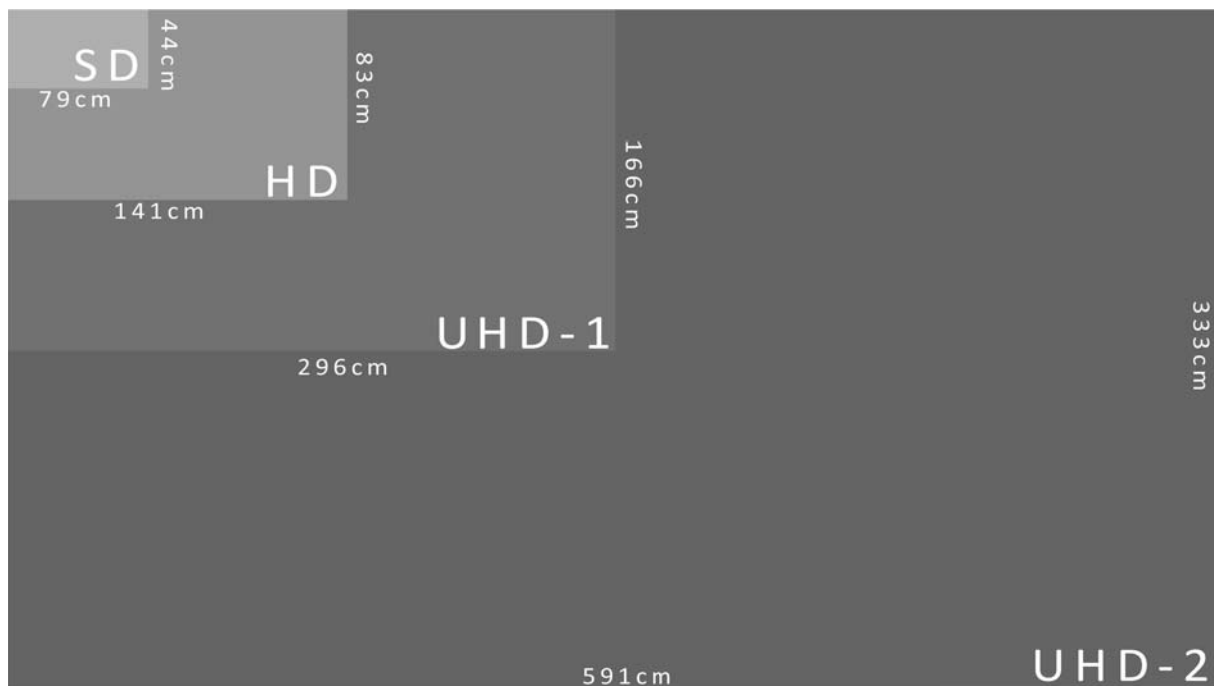


Abb. 16: Bildschirmgrößen unterschiedlicher Videoformate bei einem Betrachtungsabstand von 2,75m

Es ist deutlich erkennbar, dass bei den UHD-Auflösungen wesentlich größere Bildprojektionen möglich werden, als das momentan mit Full-HD der Fall ist. In der Berechnung wurde der Parameter Betrachtungsabstand konstant gehalten. Man kann umgekehrt ausgedrückt den Betrachtungsabstand bei gleichbleibender Monitorgröße verringern. Der Faktor der sich in beiden Fällen gleichermaßen verändert, ist der Winkel der Betrachtung β , der bei UHD-2 (8K) in diesem Beispiel 94° beträgt, bei UHD-1 (4K) 57° und im Vergleich dazu bei HD nur 29° . Damit kann durch die bei UHD höheren Auflösungen ein größerer Bereich des menschlichen Sichtbereiches von den virtuellen Inhalten des Videobildes ausgefüllt werden als bei HD. Bei SD beträgt der Winkel nur 16° .

Die hier berechneten Dimensionen des Videobildes verdeutlichen gleichzeitig, dass für die TV-Betrachtung im Heimbereich bereits mit 4K die Grenzen der Umsetzbarkeit erreicht sein dürften. Von 2,75m Betrachtungsabstand ausgegangen, müsste ein 4K-Monitor eine Bilddiagonale von 134 Zoll⁶² (im Vergleich dazu bei HD 64 Zoll) haben, um die gegebene Auflösung auszureizen. Eine 8K-Projektion ist für den Heimbereich wenig sinnvoll, da das Bild bei dem gegebenen Betrachtungsabstand eine Diagonale von 267 Zoll⁶³ haben müsste. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass es sich bei diesen berechneten Werten um

⁶² entspricht etwa 3,40m

⁶³ entspricht etwa 6,80m

Grenzwerte handelt, die auf Basis eines durchschnittlichen Sehvermögens ermittelt wurden. Das bedeutet, dass einzelne Betrachter, je nach Sehvermögen, bei den berechneten Projektionsgrößen mitunter bereits einzelne Pixel erkennen können. Deshalb verringern sich die tatsächlichen Bilddiagonalen der Monitore nach Abzug einer Toleranz etwas.

5.2 Die Bildrate

Eine weitere wesentliche Neuerung von UHD ist der Wegfall des Zeilensprungverfahrens, das bei HD teilweise noch Anwendung findet. Allerdings halbiert sich, wie bereits gezeigt wurde, die vertikale Auflösung durch dessen Einsatz. Momentan ist es noch die einzige Möglichkeit, Full-HD (1080 Zeilen) über Satellit zu übertragen (siehe Kapitel 9.1). Die von der ITU definierten Frameraten schließen die bereits bei HD verwendeten Raten 23,976 , 24 , 25 , 29,97 , 30 , 50 , 59,94 und 60Hz ein. Zusätzlich werden noch 100, 119,88 und 120Hz definiert. Diese gegenüber HD höheren Frameraten sind erforderlich, wenn z.B. schnelle Bewegungen wie beim Sport scharf abgebildet werden sollen. Mit einer höheren örtlichen Auflösung erhöht sich bei gleichbleibender Bildrate allerdings die Bewegungsunschärfe. Dieser Zusammenhang wird aus der Abbildung ersichtlich.

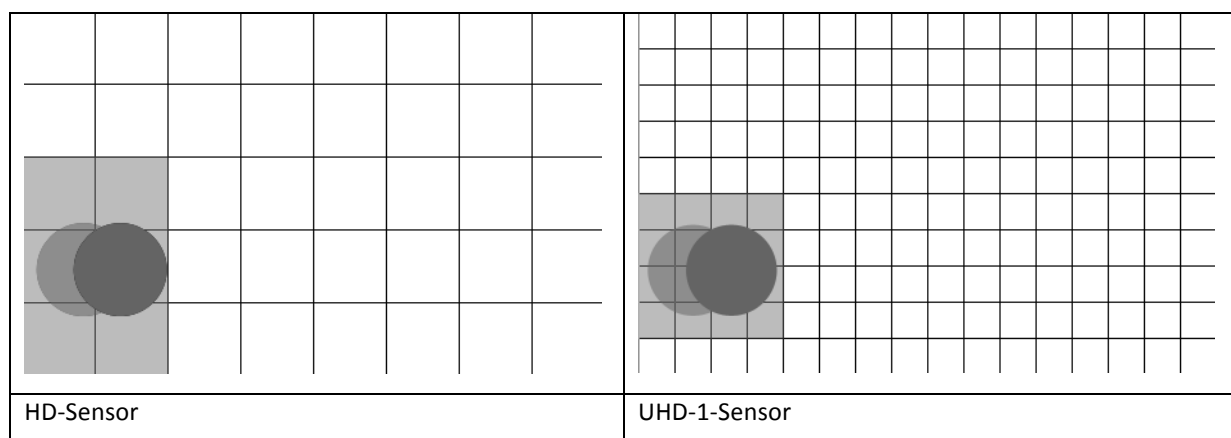


Abb. 17: Darstellung der Bewegungsunschärfe in Abhängigkeit von der Sensorauflösung

Bei einer festgelegten Belichtungszeit einer Videokamera von z.B. 1/50s, was einer Bildrate von 25Hz bei einem 180°-Shutter (50%-Shuttter) entspricht, wird ein sich durch das Bild bewegendes Objekt von verschiedenen Pixeln des Sensors erfasst. Es fällt auf, dass das Objekt in seiner Bewegung in der gleichen Zeit bei höher aufgelösten Sensoren mehr Pixel überstreicht. Dadurch erhöht sich die Bewegungsunschärfe. Bei statischen Objekten bleibt die volle Schärfe erhalten. In der Abbildung wird das statische Objekt von zwei Pixeln (HD), bzw. 3 Pixeln (UHD-1) in der Horizontalen erfasst. Findet wie im dargestellten Beispiel während der Belichtung jeweils die gleiche Bewegung statt, so bleibt das Objekt im ersten Fall (HD) innerhalb der zwei Pixel in der Horizontalen. Beim UHD-Sensor überstreicht das

Objekt hingegen ein weiteres Pixel in der Horizontalen. Damit entsteht eine Bewegungsunschärfe, die bei HD in diesem Fall nicht auftritt. Wird die Belichtungszeit beider Sensoren konstant gehalten, ist die Differenz im Schärfeeindruck zwischen statischen und bewegten Objekten höher, je höher die Auflösung ist. Um dem entgegenzuwirken, kann man die Bildrate erhöhen. Dieser Umstand lässt sich mathematisch begründen.

Ausgehend von einem HD-Video mit 50 Vollbildern (1080p50) lässt sich die maximale Geschwindigkeit eines gerade noch scharf abgebildeten Objektes in x-Richtung v_x ermitteln. Maximal bedeutet, dass dabei das Objekt von einem Frame zum nächsten in x-Richtung um zwei Pixelspalten verschoben ist. Der Grund für die zwei Spalten liegt in dem 50%-Shutter. Dabei wird der Sensor 50% der Aufnahmezeit belichtet und 50% ausgelesen und dabei nicht weiter belichtet. Ausgegangen von einer konstanten Geschwindigkeit, lässt sich der zurückgelegte Weg Δ_x des Objektes einer solchen Belichtungsperiode und die Objektgeschwindigkeit in x-Richtung berechnen mit:

$\Delta_x = \frac{2x}{r_x}$ $v_x = \frac{\Delta_x}{T} \quad ^{64}$	Parameter: x - Bildbreite Δ_x - zurückgelegte Strecke von Objekt in x-Richtung T – Belichtungszeit r_x - Auflösung in x-Richtung v_x - Geschwindigkeit des Objektes in x-Richtung
--	--

Bei einem 1080p50-Video beträgt

$$v_x = 0,104 \text{ x.}$$

Wendet man die gleiche Formel auf ein UHD-1-Video mit 3840 Spalten an, so erhält man:

$$v_x = 0,05 \text{ x.}$$

Für UHD-2 mit seinen 7680 Spalten ergibt sich:

$$v_x = 0,026 \text{ x.}$$

Hier wird deutlich, dass, wenn man die Framerate und den Shutter (und damit auch die Belichtungszeit) konstant beibehält und die Auflösung erhöht, die maximale Geschwindigkeit von sich horizontal bewegenden Objekten, die noch scharf abgebildet werden können, sinkt. Dieser Umstand gilt analog natürlich genauso in der y-Richtung. Für die Praxis bedeutet das,

⁶⁴ vgl. Schäfer 2013, S. 12

dass Kameraschwenks langsamer durchgeführt werden sollten, je höher die Auflösung des Sensors ist, da die maximale Geschwindigkeit von statischen Objekten direkt von Δ_x abhängt. Das ist sicherlich nur bedingt praktikabel, denn wenn dynamische Objekte (z.B. fliegender Ball bei einer Sportaufnahme) aufgenommen werden, spielt die Schwenkgeschwindigkeit eine untergeordnete Rolle. Wenn die langsamere Objektgeschwindigkeit keine Option darstellt, muss der Parameter der Belichtungszeit variiert werden, um die Bewegungsunschärfe zu reduzieren. Wenn man mit UHD die gleiche horizontale Maximalgeschwindigkeit wie bei HD erreichen will, sind folgende Belichtungszeiten erforderlich.

UHD- 1	UHD-2
$0,104 \times = \frac{2 \times}{3840 T} \quad T = \frac{1}{200} \text{ s}$	$0,104 \times = \frac{2 \times}{7680 T} \quad T = \frac{1}{400} \text{ s}$

Die hier errechneten Belichtungszeiten entsprechen bei einem 50%-Shutter den Bildraten 100Hz bei UHD-1 und 200Hz bei UHD-2. Damit wird deutlich, dass die von der ITU definierten höheren Frameraten in einem direkten Zusammenhang zu den erhöhten Auflösungen von UHD stehen und keinesfalls nur eine zusätzliche Verbesserung darstellen. Anders ausgedrückt: Wenn man bei einer Erhöhung der örtlichen Auflösung die Bildrate beibehält, verstärkt sich die Bewegungsunschärfe. Sie steht, korrekt ausgedrückt, im direkten Zusammenhang zu der Belichtungszeit. Über das Schließen des Shutters, kann man theoretisch die Belichtungszeit verkürzen, ohne die Framerate zu erhöhen. Das führt allerdings zu dem Shuttereffekt (auch Stroboskopeffekt), da aufeinander folgende Einzelbilder sich dann stärker unterscheiden, denn zwischen den einzelnen Belichtungsphasen vergeht dabei prozentual mehr Zeit. Dieser Umstand ist in der Abbildung dargestellt.

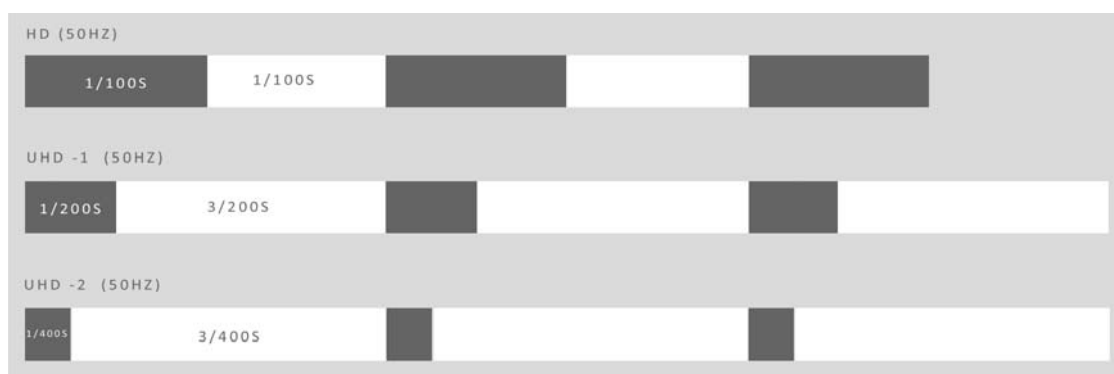


Abb. 18: Shutter-Effekt bei 50Hz Bildrate in Abhängigkeit von der Belichtungszeit

Behält man die Framerate von 50Hz bei, so wird bei UHD-1 ein 25%-Shutter erforderlich, um die gleiche Bewegungsunschärfe wie bei HD zu erhalten. Bei UHD-2 müsste der Shutter noch einmal halbiert werden auf 12,5%. Ein solches Verfahren ist nicht praktikabel wegen des bereits angesprochenen Shuttereffektes, der dabei auftritt. Wenn Bilder schnell bewegende Objekte beinhalten (z.B. bei einer Sportübertragung), so ist bei UHD eine höhere Bildrate als 50Hz erforderlich, um der entstehenden Bewegungsunschärfe entgegenzuwirken. Somit bedingt eine höhere örtliche Auflösung gewissermaßen eine Erhöhung der zeitlichen Auflösung. Eine höhere Bildrate führt bei gleichbeliebenden Shutter wiederum zu kürzeren Belichtungszeiten.

Aus gestalterischer Sicht stellt die höhere Bildrate ein weiteres Problem dar, da sie durch ihren Realismus im Widerspruch zur Erwartung stehen kann. Für TV-Live-Übertragungen von diversen Events kann es durchaus förderlich sein für den Eindruck des Betrachters, selbst vor Ort zu sein. Wendet man HFR allerdings auf szenische, vor allem fiktionale Produktionen an, so gehen die Meinungen darüber weit auseinander. Als der Regisseur Peter Jackson 2012 den Spielfilm „Der Hobbit“ mit 48 Bildern pro Sekunde drehte, anstatt der bei Film üblichen 24, polarisierte das durchaus. Die dadurch entstehende geringere Bewegungsunschärfe ist jedoch für Stereo-3D-Filmaufnahmen förderlich, da die verschwommenen Kanten eines schnellen Objektes bei 24Hz-Aufnahmen die vom Betrachter wahrgenommene Tiefe verschieben können, bzw. zu einem Bildzerfall führen. Das ist durch die entstehende scheinbare Disparität begründet, also die horizontale Verschiebung von linkem und rechtem Einzelbild über das gewünschte Maß hinaus durch eben besprochene Bewegungsunschärfen. Für ein gutes 3D-Erlebnis schneller Bildinhalte sind 50Hz bei HD empfohlen, was bei einem 3D-TV-Signal bestehend aus linkem und rechtem Bildsignal eine Bildrate von 100Hz bedeuten würde.⁶⁵ Allerdings kollidiert der visuelle Realismus mit unserer Sehgewohnheit von Film.⁶⁶ Das führt dazu, dass sich Zuschauer nicht auf die Handlung einlassen, da ihnen der Bewegungseffekt ohne den typischen 24Hz-Filmlook fehlt. Damit bedeutet HFR nicht zwangsläufig eine Verbesserung der Immersion, da die Erwartungshaltung des Zuschauers

⁶⁵ vgl. 3D TV 2012, S. 18

⁶⁶ vgl. Hobbit vs. Hobbit, Abs. 6, <http://www.soundandvision.com/content/hobbit-versus-hobbit#VIRv6y7iODhlvioq.97>, Abruf am 2.Februar 2016

eine essentielle Rolle spielt, deren Untersuchung im Rahmen weiterer wissenschaftlicher Arbeiten auch in Bezug auf die weitere Entwicklung von UHD-TV interessant sein könnte.

Aus den mit HFR verbunden kurzen Belichtungszeiten ergibt sich unmittelbar ein weiteres Problem, da die Lichtmenge, die auf den Sensor einer Kamera trifft, geringer wird. Eine höhere Empfindlichkeit des Sensors ist damit zwangsläufig ebenfalls erforderlich, um eine Unterbelichtung zu vermeiden.

5.3 Der Dynamikumfang – High Dynamic Range (HDR)

Neben der Erhöhung der Auflösung in örtlicher (Pixel) und zeitlicher (Bildrate) Dimension, ist für UHD eine Erweiterung des Kontrastverhältnisses definiert. Die in der HD-Norm Rec.709 festgelegten Kontrastwerte beziehen sich noch auf Röhrenmonitore und gelten seit Jahren als nicht mehr zeitgemäß.⁶⁷ Die dort festgelegte maximale Helligkeit beträgt 100cd/m^2 . Moderne Displays liegen heute bereits bei bis zu 400cd/m^2 . Die technischen Möglichkeiten werden an dieser Stelle von der Norm längst nicht ausgeschöpft (siehe Kapitel 8). Die Abbildung verdeutlicht, welches Potential der Dynamikbereich in Bezug auf realitätsnahe Abbildungen noch bietet. In der Abbildung ist dargestellt, dass das menschliche Auge durch Adaption Helligkeiten im Bereich von 10^{-6} bis 100 Mio cd/m^2 wahrnehmen kann. Die gleichzeitig erfassbaren Helligkeiten (ohne Adaption) liegen im Bereich von $0,1\text{cd/m}^2$ und 10.000cd/m^2 . HDR zielt auf die Abdeckung dieses Bereiches.

⁶⁷ vgl. Beyond HD 2014, S. 4

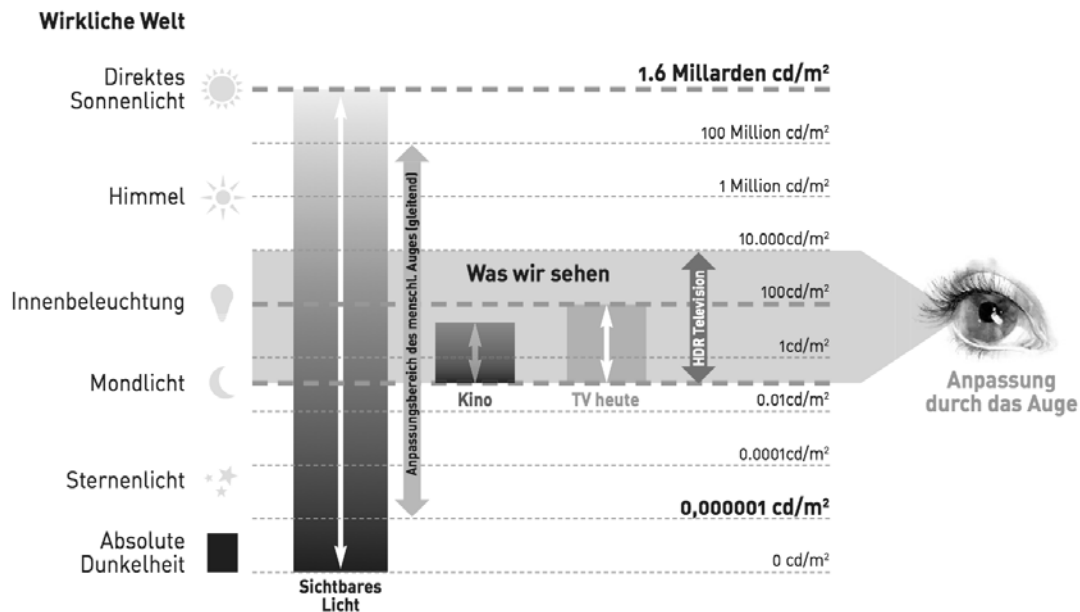


Abb. 19: Kontrastwahrnehmungsfähigkeit des Menschen⁶⁸

Aus der Filmindustrie kommt die Forderung, eine maximale Helligkeit von 10.000 cd/m^2 und einen Schwarzwert bei $0,005 \text{ cd/m}^2$ zu definieren. Das resultierende Kontrastverhältnis beträgt dabei $2.000.000:1$. Es gibt bereits erste Entwicklungen diverser Hersteller und Produzenten⁶⁹, die sich allesamt zum Ziel gesetzt haben, voll abwärtskompatibel zu sein. Das ist erforderlich, da UHD-Monitore und -TV-Geräte der ersten Generation bereits im Umlauf sind und natürlich mit künftigen Formaten umgehen können sollten. Aus diesem Grund sollte HDR künftig als Option über einen separaten Datenstrom übertragen werden.⁷⁰ So ist es in folgendem Blockschaltbild dargestellt, wobei SDR für Standard Dynamic Range steht, also das bisher übertragene Videobild ohne HDR.

⁶⁸ Quelle: Beyond HD 2014, S. 5

⁶⁹ darunter BBC, Dolby, Philips, Technicolor

⁷⁰ vgl. Beyond HD 2014, S.5

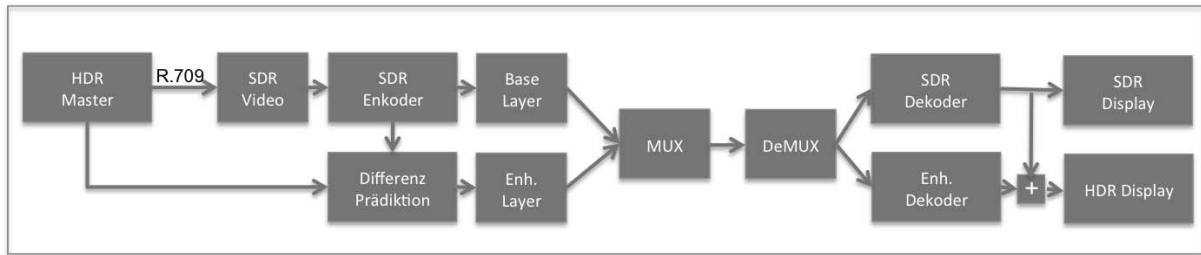


Abb. 20: Abwärtskompatible Übertragung eines HDR-Videos⁷¹

In der Abbildung unten sind die aktuell darstellbaren Farben nach Rec.709 (siehe Kapitel 4.6) mit dem möglichen Luminanzpegel im dreidimensionalen Raum dargestellt. Die grau schraffierte Fläche zeigt den durch HDR erreichbaren Farbraum, der auch durch die neue Norm BT.2020 definiert wird. Es ist ersichtlich, dass die Erweiterung des darstellbaren Luminanzbereiches weitaus mehr zur Vergrößerung des Farbraumes beitragen kann, als eine Vergrößerung des Primärvalenzdreiecks gemäß BT.2020, wie es im nächsten Kapitel beschrieben wird.

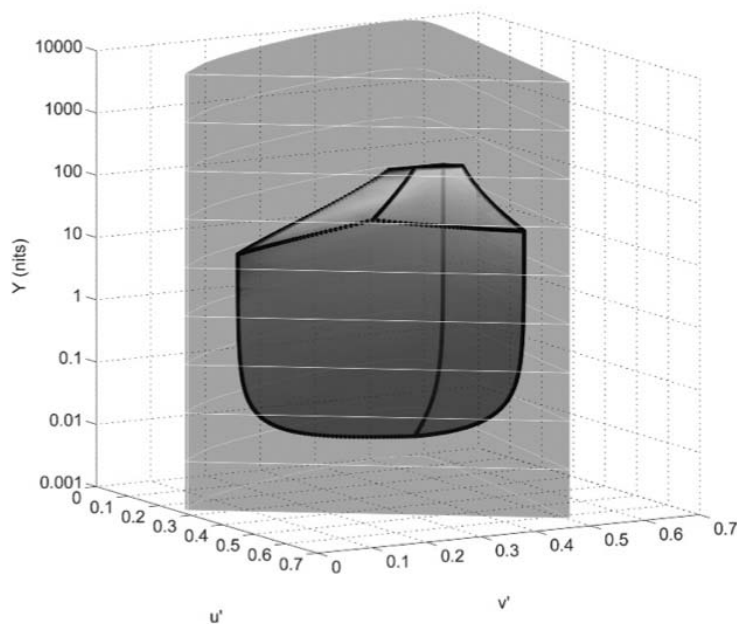


Abb. 21: Der erweiterte Dynamikbereich durch HDR⁷²

5.4 Der erweiterte Farbraum (BT.2020 und XYZ)

In den Kapiteln 3.1 und 4.6 wurde bereits ausführlich auf Farbräume im Allgemeinen und den HD-Farbraum Rec.709 im Speziellen eingegangen. Es wurde gezeigt, dass dieser Farbraum nicht mehr zeitgemäß ist. Aktuelle Endgeräte beherrschen weitaus größere

⁷¹ vgl. Beyond HD 2014, S. 17

⁷² Quelle: Beyond HD 2014, S. 8

Farbräume, als sie derzeit von beispielsweise von HDTV und BluRays bedient werden. Es mangelt allerdings an entsprechenden Inhalten, die dieses Potential ausschöpfen. Für UHD wurde zunächst der erweiterte Farbraum BT.2020 empfohlen. Er definiert die Primärvalenzen wie folgt.

Primärvalenz	x	y
Rot	0,708	0,292
Grün	0,170	0,797
Blau	0,131	0,046

Tabelle 6: Definition der Primärvalenzen nach BT.2020

Werden die Werte in dem x-y-Koordinatensystem eingetragen, wird ersichtlich, dass vor allem im Grünbereich eine feinere Farbabstufung definiert ist. Wie bereits erklärt wurde, ist der menschliche Sehsinn in diesem Wellenlängenbereich besonders empfindlich für Veränderungen der Helligkeit. Insofern trägt BT.2020 dieser physiologischen Gegebenheit Rechnung. Im Rot sind die Verbesserungen im Vergleich zu Rec.709 relativ gering, im Blau sogar nur marginal. Der Luminanzpegel ist in diesem Farbraum definiert über:

$$Y = 0,2627 R + 0,6780 G + 0,0593 B^{73}$$

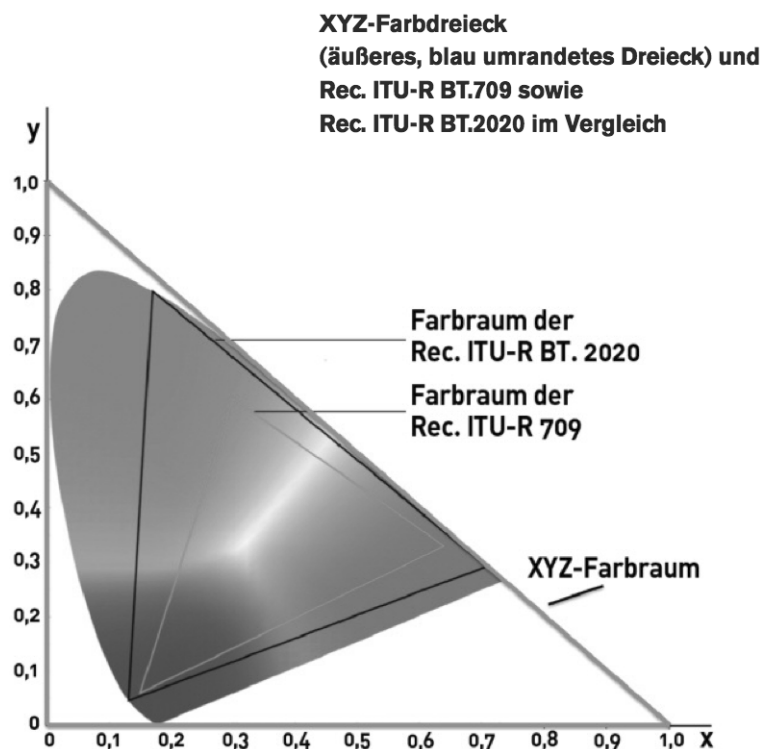


Abb. 22: Farbräume im Vergleich⁷⁴

⁷³ vgl. Rec.ITU-R BT.2020, S. 4

Während der neue Farbraum den Immersionseffekt beim Betrachter erhöhen könnte, gibt es noch einen weiteren Vorschlag zur Erweiterung des bisherigen HD-Farbraumes. Die Tochter der Hollywood Studios, Movie Labs, hat in ihrer Spezifikationsforderung für zukünftige Videoformate vorgeschlagen, den XYZ-Farbraum (blaues Dreieck in Abbildung 23) für zukünftige UHD-Distributionen zu verwenden.⁷⁵ Dieser virtuelle Farbraum wird heute schon für die Verbreitung digitaler Filmkopien für das Kino verwendet. Mit dessen Hilfe lassen sich alle sichtbaren Farben codieren. Die Endgeräte müssen beim Decodieren das Signal dann allerdings in ihren eigenen RGB-Farbraum überführen, um es darstellen zu können. Damit wäre aber eine korrekte Farbdarstellung an allen Endgeräten möglich. Aus der Abbildung geht aber auch hervor, dass der Farbraum nicht sichtbare Bereiche einschließt, was zu einer geringeren Codiereffizienz führt. Movie Labs empfiehlt weiterhin eine Quantisierung von 12 Bit. Allerdings entsteht dadurch im Endgerät ein hoher Rechenaufwand, weil für jeden einzelnen Bildpunkt eine Transformation vom XYZ- in den RGB-Bereich notwendig wird. Welche Technologie sich letztlich durchsetzt, ist an dieser Stelle noch nicht entschieden. In Kapitel 8 wird eine Lösung vorgestellt, die das Technikunternehmen Dolby versucht, am Markt zu etablieren.

5.5 UHD Audio

Neben den in dieser Arbeit besprochenen Bildverbesserungen, ist für UHD auch das Audiosystem überarbeitet worden. Neben Stereo und Dolby 5.1 existieren neue Ansätze wie MPEG-H, Dolby Atmos und DTS X, die an dieser Stelle nur genannt werden sollen.⁷⁶ Mit den zukünftigen Verfahren orientiert man sich an den unterschiedlichen Szenarien der Audioumgebung, von der mobilen Wiedergabe bis hin zu modernen Heimkinosystemen. Sowohl Dolby als auch Konkurrent DTS setzen auf sogenannte objektbasierte Codierungen, die nicht mehr an eine bestimmte Anzahl von Lautsprechern zur Wiedergabe geknüpft sind. Dadurch wird die Audiowiedergabe automatisch an das genutzte Audiosystem angepasst (Stereo, 5.1, 7.1 usw.) Die vom Fraunhofer Institut entwickelte 3D-Audio-Technologie ist Grundlage des zukünftigen MPEG-H-3D-Audio-Standards, der einen 22:1-Ton unterstützt. Der immersive 3D-Sound kann auch über mobile Geräte via Kopfhörer ausgegeben

⁷⁴ Quelle: Beyond HD 2014, S. 7

⁷⁵ Movie Labs 2013, S. 3

⁷⁶ vgl. Beyond HD 2014, S. 6, Abs.4

werden.⁷⁷ Immersiv bedeutet auf den Klang bezogen, dass Objekte, die im gesehenen Video eine Rolle spielen auch akustisch präzise verortet werden können – ein Helikoptersound kommt z.B. von oben. Ein weiterer Vorteil von UHD-Audio ist, dass empfängerseitig mehr Eingriffsmöglichkeiten eröffnet werden. So sind Szenarien denkbar, in denen bei einer Sportübertragung den Kommentatorton separat reguliert werden kann, ohne den Atmo-Ton zu beeinflussen oder bei einem Spielfilm die Dialoglautstärke separat von Atmosphärensounds geregelt wird.

5.6 Das Datenaufkommen

Als Folge der Vergrößerung der Bildauflösung, Erhöhung der Framerate und der Quantisierungsstufen steigt die Datenrate bei UHD in im Vergleich mit HD hohe Bereiche. Im folgenden sollen die Produktionsformate definiert werden, wobei es Kamerahersteller gibt, die eine proprietäre RAW-Aufzeichnung ermöglichen, was zu Datenraten führt, die über hier beschriebene Produktionsstandards von UHD sogar hinausgehen. Um die Netto-Videodatenrate zu bestimmen multipliziert man die Anzahl der Bildpunkte mit den Quantisierungsstufen und der Bildanzahl pro Sekunde (Framerate). Für ein 10Bit-RGB-Signal ergeben sich folgende Netto-Datenraten.

RGB-Videodatenraten (4:4:4):

Berechnung der RGB-Videodatenrate bei UHD-1 (50FPS):

$$\text{Datenrate} = 10\text{Bit} \times ((3840 \times 2160) + (3840 \times 2160) + (3840 \times 2160)) \times 50 \text{ FPS}$$

$$\text{Datenrtate} = 11,6 \text{ Gbit/s}$$

Berechnung der RGB-Videodatenrate bei UHD-2 (50FPS):

$$\text{Datenrate} = 10\text{Bit} \times ((7680 \times 4320) + (7680 \times 4320) + (7680 \times 4320)) \times 50 \text{ FPS}$$

$$\text{Datenrtate} = 46,4 \text{ Gbit/s}$$

Für UHD ist ausschließlich eine progressive Bildabtastung definiert⁷⁸. Wie bei SDTV und HDTV wird zur Reduzierung der Datenrate eine Farbrunterabtastung genutzt. Dafür sind die Abtastverhältnisse 4:2:2 und 4:2:0 festgelegt.

⁷⁷ Fraunhofer IIS 2013

⁷⁸ vgl. BT.2020 2012, S. 2

YCbCr-Videodatenraten (4:2:2):

Berechnung der YCbCr -Videodatenrate bei UHD-1 (50FPS):

$$\text{Datenrate} = 10\text{Bit} \times ((3840 \times 2160) + (3840 \times 2160)) \times 50 \text{ FPS}$$

$$\text{Datenrtate} = 7,7\text{Gbit/s}$$

Berechnung der YCbCr -Videodatenrate bei UHD-2 (50FPS):

$$\text{Datenrate} = 10\text{Bit} \times ((7680 \times 4320) + (7680 \times 4320)) \times 50 \text{ FPS}$$

$$\text{Datenrtate} = 30,9 \text{ Gbit/s}$$

YCbCr-Videodatenraten (4:2:0):

Berechnung der YCbCr -Videodatenrate bei UHD-1 (50FPS):

$$\text{Datenrate} = 10\text{Bit} \times \left((3840 \times 2160) + \frac{3840 \times 2160}{2} \right) \times 50 \text{ FPS}$$

$$\text{Datenrtate} = 5,8 \text{ Gbit/s}$$

Berechnung der YCbCr -Videodatenrate bei UHD-2 (50FPS):

$$\text{Datenrate} = 10\text{Bit} \times \left((7680 \times 4320) + \frac{7680 \times 4320}{2} \right) \times 50 \text{ FPS}$$

$$\text{Datenrtate} = 23,2 \text{ Gbit/s}$$

Stellt man diese Datenraten grafisch dar, zeigt sich sehr deutlich der enorme Anstieg bei UHD im Vergleich zu SD und HD. Die hier berücksichtigten Videoparameter schließen noch nicht die für UHD in Europa empfohlenen 100FPS ein. Diese doppelte Bildfrequenz führt zu einer theoretischen 4:4:4-Netto-Datenrate von 23,2 Gbit/s bei UHD-1 und 92,7 Gbit/s bei UHD-2. Mit einer Farbunterabtastung von 4:2:0 ergeben sich bei 100FPS immerhin 11,6Gbit/s bei UHD-1 und 46,3Gbit/s bei UHD-2. Stellt man diesen Datenraten aktuelle Übertragungsbandbreiten gegenüber, wird deutlich, dass derartige Videodateien effizient codiert werden müssen.

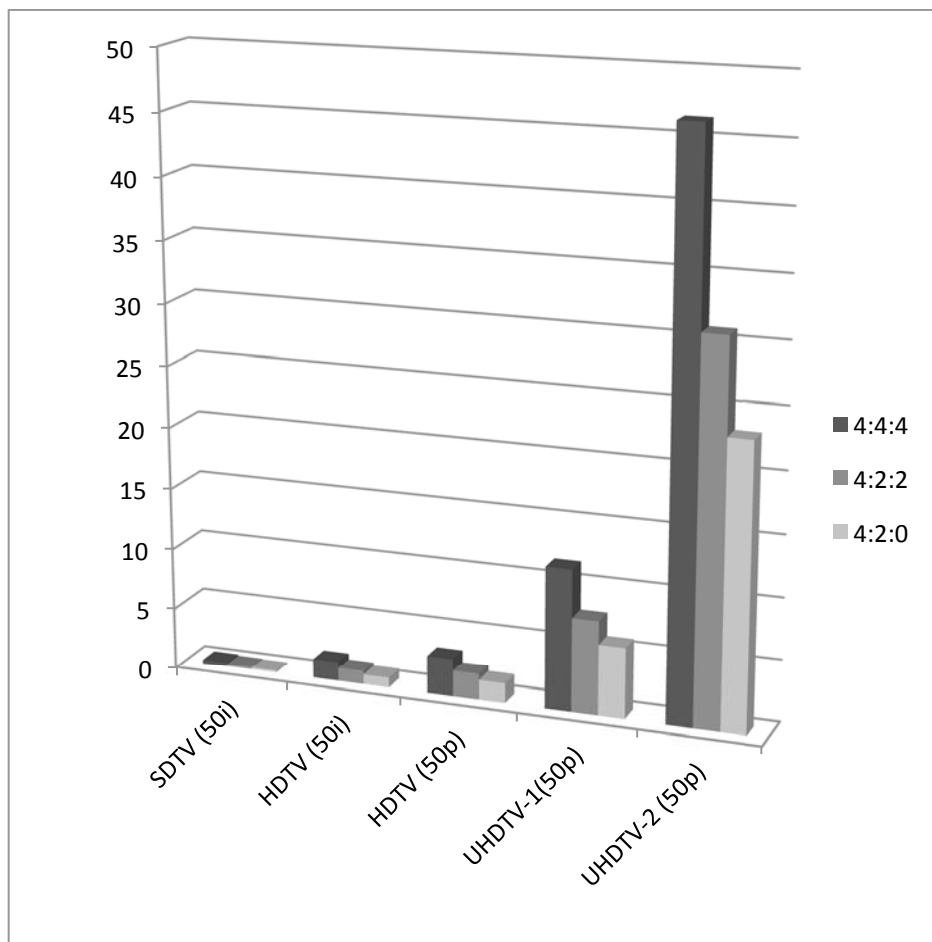


Abb. 11: Vergleich der Netto-Videodatenraten in Gbit/s unterschiedlicher Standards auf Basis von 50 FPS

5.7 Der H.265-Codec (HEVC)

Nachdem im vorherigen Kapitel die Dimensionen der Nettodatenraten von UHD vorgestellt worden sind, zeigt sich die Diskrepanz zu den verfügbaren Bandbreiten der geläufigen Videoübertragungswege. Auf die Übertragungstechnologien wird später noch detaillierter eingegangen. Es wird aber an dieser Stelle klar, dass die erreichbaren Übertragungsraten möglicher Distributionswege weit unter den UHD-Netto-Datenraten liegen. Für eine Übertragung ist wie auch schon bei SD und HD eine Kompression der Videodaten erforderlich. Aktuell findet bei HD heute meistens der Codec H.264 AVC Verwendung (siehe Kapitel 4.5).

Übertragungstechnologie	Erreichte Übertragungsrate pro Kanal in Praxis
DVB-C (256QAM, 8MHz)	51,29Mbit/s
DVB-T1	15Mbit/s ⁷⁹
DVB-T2 (Sendestart in Deutschland: Mitte 2016)	33,5Mbit/s ⁸⁰

⁷⁹ vgl. HD-Signale über die Hausantenne,

⁸⁰ vgl. ebenda

DVB-S1	< 50Mbit/s ⁸¹
DVB-S2	Ca. 60 Mbit/s ⁸²
VDSL2	< 100Mbit/s ⁸³
LTE	< 50Mbit/s

Tabelle 7: Geläufige Übertragungsbandbreiten

Um die Datenrate von Videos bei gleichbleibender visueller Qualität weiter zu reduzieren, steht mittlerweile ein neuer Codec zur Verfügung, der die Nachfolge von H.264 AVC antreten soll. Es handelt sich dabei um H.265 HEVC⁸⁴. Um die Auswirkungen auf die Datenrate durch den Codec zu demonstrieren, wurde ein Clip von 13 Sekunden Länge aus dem RAW-Format sowohl in H.264, als auch H.265 encodiert und die Datenraten im Anschluss miteinander verglichen (siehe Tabelle 6). Das Encoding fand dabei nicht in Echtzeit statt, was zu einer höheren Kompressionsrate führt, wie unten noch gezeigt wird. Als Ausgangsmaterial diente Rohmaterial eine Sony F65-Kamera mit 50 Bildern/Sekunde in UHD-1. Die Dateigröße der RAW-Datei betrug 6,56GB. Zum Encoding wurde der Adobe Media Encoder CC 2015 genutzt. Gravierend ist der Unterschied in der Dauer des Encodings zwischen beiden Verfahren.

	H.264 AVC	H.265 HEVC
Bitrate	25 Mbit/s	15Mbit/s
Dateigröße	41MB	25MB
Encoding-Dauer	2 Minuten	40 Minuten

Tabelle 8: Vergleich von H.264- und H.265-Kompression (zeitunkritisch)

Der Codec ist ein Gemeinschaftsprojekt der Moving Pictures Expert Group und der ITU-T Video Coding Experts Group. Seit Anfang 2013 ist der Standard durch die ITU bestätigt, bislang allerdings noch wenig implementiert. Da die Anwendungsanforderungen sehr unterschiedlich sind, ist es aus ökonomischer Sicht wenig sinnvoll, alle möglichen Anwendungen in einem Bitstrom zu implementieren. Deshalb wurden bei H.265 wie auch schon bei H.264 unterschiedliche Profile definiert, die nach Tiers (Stufen) und Levels (Ebenen) näher spezifiziert sind.⁸⁵ In folgendem ist ein Auszug aus den höheren H.265-

⁸¹ vgl. it-wissen.info (<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/DVB-satellite-DVB-S.html>, Abruf am 20. 2. 2016)

⁸² vgl. ebenda

⁸³ maximale Geschwindigkeit, die Telekom Privatkunden über VDSL momentan anbietet

⁸⁴ High efficiency video codec (aus Englischem: hocheffizienter Videocodec)

⁸⁵ vgl. Rec. ITU-T H.265-v3 2015, S.2

Levels⁸⁶ mit den maximalen Frameraten dargestellt. Für HD sind dabei bis zu 300fps definiert, für UHD-2 immerhin noch 128fps, was über die Norm von 120fps hinausreicht.

Level:				5	5,1	5,2	6	6,1	6,2
Max luma picture size (samples):				8 912 896	8 912 896	8 912 896	35 651 584	35 651 584	35 651 584
Max luma sample rate (samples/sec)				267 386 880	534 773 760	1 069 547 520	1 069 547 520	2 139 095 040	4 278 190 080
Format nickname	Luma width	Luma height	Luma picture size						
625 SD	720	576	442 368	300	300	300	300	300	300
480p (16:9)	864	480	458 752	300	300	300	300	300	300
720p HD	1280	720	983 040	272	300	300	300	300	300
1080 HD	1920	1080	2 088 960	128	256	300	300	300	300
3840x2160 (4*HD)	3840	2160	8 355 840	32	64	128	256	300	300
7680x4320	7680	4320	33 423 360	-	-	-	32	64	128.0

Tabelle 9: Auszug über maximale Bildraten der H.265-Level 5 - 6.2 mit ihren Spezifikationen⁸⁷

Für das höchste Level 6.2 reicht die festgelegte Bandbreite von 230Mbit/s bis 780Mbit/s. Damit ließe sich ein H.265-codierter 4320p120-Videostream (UHD-2) theoretisch sogar über eine Gigabit-LAN-Verbindung übertragen. H.265 arbeitet wie auch H.264 mit einer Bewegungsvorhersage. Diese funktioniert besser, wenn Bilder höher aufgelöst sind, da Vektoren präziser arbeiten. Ist die maximale Blockgröße bei H.264 auf 16x16 festgelegt, so erhöht sich diese bei H.265 auf 64x64.⁸⁸ Die Datenrate eines Videos kann durch H.265 gegenüber dem Vorgängercodex um 40% reduziert werden.⁸⁹ Diese Reduzierung der Datenrate bezieht sich dabei auf den objektiv messbaren PSNR-Wert (Signal-Rausch-Abstand). Eine subjektive Beurteilung durch Testpersonen am Fraunhofer Heinrich Hertz-Institut Berlin hat sogar eine Reduzierung der Datenrate um 50% bei gleich wahrgenommener Bildqualität ergeben.

⁸⁶ Die Level 1 bis 4.1 haben für UHD keine Bedeutung

⁸⁷ vgl. Rec. ITU-T H.265-v3 2015, S.2

⁸⁸ vgl. H.265.org: <http://x265.org/hevc-h265/>, Abruf im Dezember 2015

⁸⁹ Adobe Blog, <http://blogs.adobe.com/premierepro/2015/11/adobe-media-encoder-cc-2015-1.html>, Abruf am 20. 2. 2016

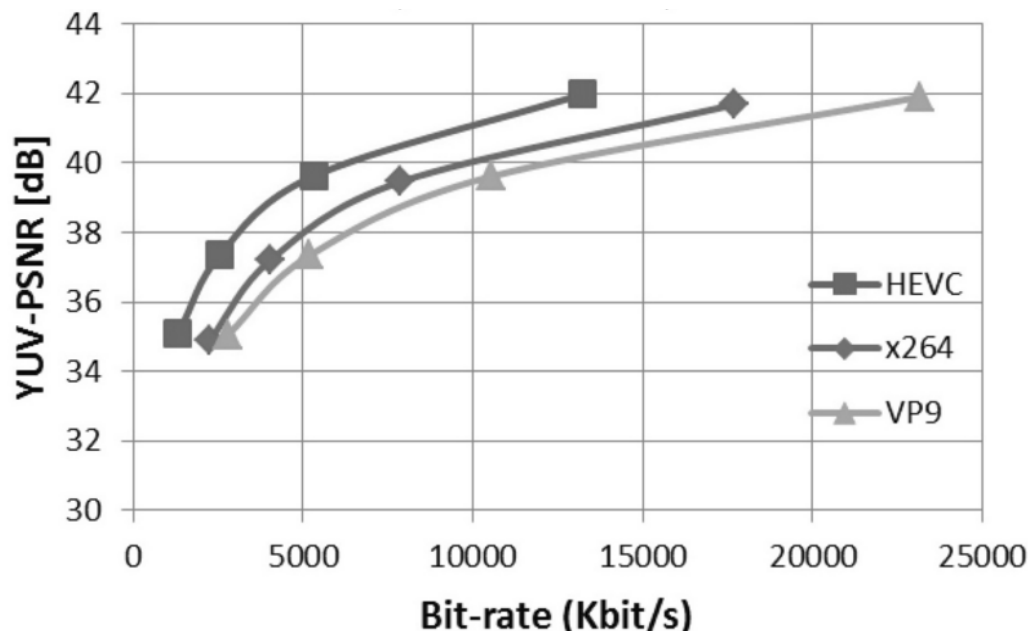


Abb. 23: Vergleich der PSNR-Werte von H.265 und H.264⁹⁰

Diesen Grad an Effizienz leisten Echtzeit-Encoder allerdings bislang noch nicht. Weiterhin muss auch anwendungsspezifisch unterschieden werden. Für die Bereiche TV-Broadcast und Video on Demand ist eine höhere Kompression durch den Einsatz von B-Bildern (siehe Kapitel 4.3) möglich, bei interaktiven Videokonferenz-Anwendungen ist hingegen eine geringe Latenz erforderlich, was weniger lange Group of Pictures zulässt und damit die Kompressionsrate verringert.⁹¹ Die bereits genannten 40% gegenüber H.264 sind damit auch im professionellen Editing-Bereich nicht erreichbar, weil dort nur Einzelbilder (intra-frame) codiert werden und Redundanzen zwischen aufeinanderfolgenden Bildern bestehen bleiben. Hier konnte mit H.265 die Datenrate noch um immerhin 26% gegenüber H.264 reduziert werden.⁹²

Bei einer software-basierten Encodierung fallen die Ergebnisse gravierender aus. Der Einbruch der Codier-Effizienz liegt vor allem dann vor, wenn möglichst schnell codiert wird, da die Geschwindigkeit des Encodings zu Lasten der Kompressionsrate geht. In der Abbildung unten sind die Ergebnisse einer Echtzeit-Encodierung dargestellt. Als Referenz (0%

⁹⁰ vgl. FKTG.org: <https://www.fktg.org/node/6416/derneuecodierstandhevc>, Abruf im Oktober 2015

⁹¹ vgl. Fernseh- u. Kinotechn. Gesellschaft, <https://www.fktg.org/node/6416/derneuecodierstandhevc>, Abruf am. 21. 2. 2016

⁹² vgl. ebenda

Bitrate improvement) ist ein mit 4000kbit/s encodiertes x264-Video⁹³ gewählt worden. Die Encodergeschwindigkeit liegt hierbei bei 0,6 Sekunden pro Frame. Zur Vergleichbarkeit der andern Codecs wird hier der SSIM-Wert⁹⁴ herangezogen. Dabei handelt es sich um einen Wert zur Bestimmung der objektiven Ähnlichkeit von Bilddaten, der am Laboratory for Video Engineering an der University of Texas at Austin entwickelt wurde.⁹⁵ SSIM bietet eine bessere Vergleichbarkeit als der reine PSNR-Wert, da er eher an der menschlichen Wahrnehmung ausgerichtet ist. Ein mit x265⁹⁶ in gleicher Geschwindigkeit encodiertes Video erzeugt hier eine um 10% geringere Datenrate. Der libvpx-Codec, hinter dem der VP9-Codec steht, schneidet in der zeitkritischen Codierung etwas besser ab. Aber auch seine Bitrate liegt nur ca. 10-20% unter der von x264. Wenn allerdings schneller encodiert wird als mit 0,6 Sekunden pro Frame, schneiden die beiden Codecs x265 und libvpx sogar schlechter ab als x264. Ausgegangen von einer progressiven Bildfrequenz von 50Hz beträgt die Encodierzeit für ein Einzelbild 0,02 Sekunden, was momentan über Software-Encoding ein deutlich schlechteres Ergebnis liefert als x264.⁹⁷ Dabei kommt hinzu, dass es sich bei dem Referenzmaterial nur um HD-Video handelt. Bei UHD-1, bzw. UHD-2 ist die Hürde für ein Software-Live-Encoding sicher um einiges höher. Die oft proklamierte Codier-Effizienz, verbunden mit einer Bitrateneinsparung von über 40% von H.265 gegenüber dem Vorgänger H.264 wird nur bei sehr langsamem Encoding von 5-10 Sekunden pro Frame erreicht, was für Echtzeitanwendungen keine Relevanz hat.

Auf Decoderseite stellt das ein geringeres Problem dar, da bei gleicher objektiver Videoqualität von H.264 und H.265 (gleicher SSIM-Wert, jedoch höhere Datenrate bei H.264), das Decodieren der Koeffizienten länger dauert, je höher die Datenrate ist.⁹⁸ Auch wenn H.265 komplexer aufgebaut ist als H.264, so gleicht die Ersparnis an Datenrate bei gleicher objektiver Qualität das wieder aus, so dass die größte Herausforderung für einen

⁹³ x264 ist ein Open Source –Codec, der vergleichbar mit H.264 ist (z.B. Anwendung bei VLC-Player)

⁹⁴ SSIM: Structural Similarity (aus dem Englischen: Strukturelle Ähnlichkeit)

⁹⁵ vgl. <https://www.ece.utexas.edu/news/prof-alan-bovik-and-team-win-emmy-award-video-quality-tool>, Abruf am 30. März 2016

⁹⁶ x265 ist ein Open Source –Codec, der vergleichbar mit H.265 ist (z.B. Anwendung bei VLC-Player)

⁹⁷ Stand September 2015

⁹⁸ vgl. <https://blogs.gnome.org/rbultje/2015/09/28/vp9-encodingdecoding-performance-vs-hevch-264/>, Abruf am 30. März 2016

Live-Betrieb nach wie vor auf der Encoderseite liegt. Hier kommt bislang ausschließlich spezielle Hardware zum Einsatz. Auf Empfängerseite sollte das Decodieren von H.265 und x265, sowie VP9 für UHD auch über einen Software-Encoder funktionieren, wobei entsprechende Receiver bereits mit H.265-Hardware-Decodern ausgestattet sind.

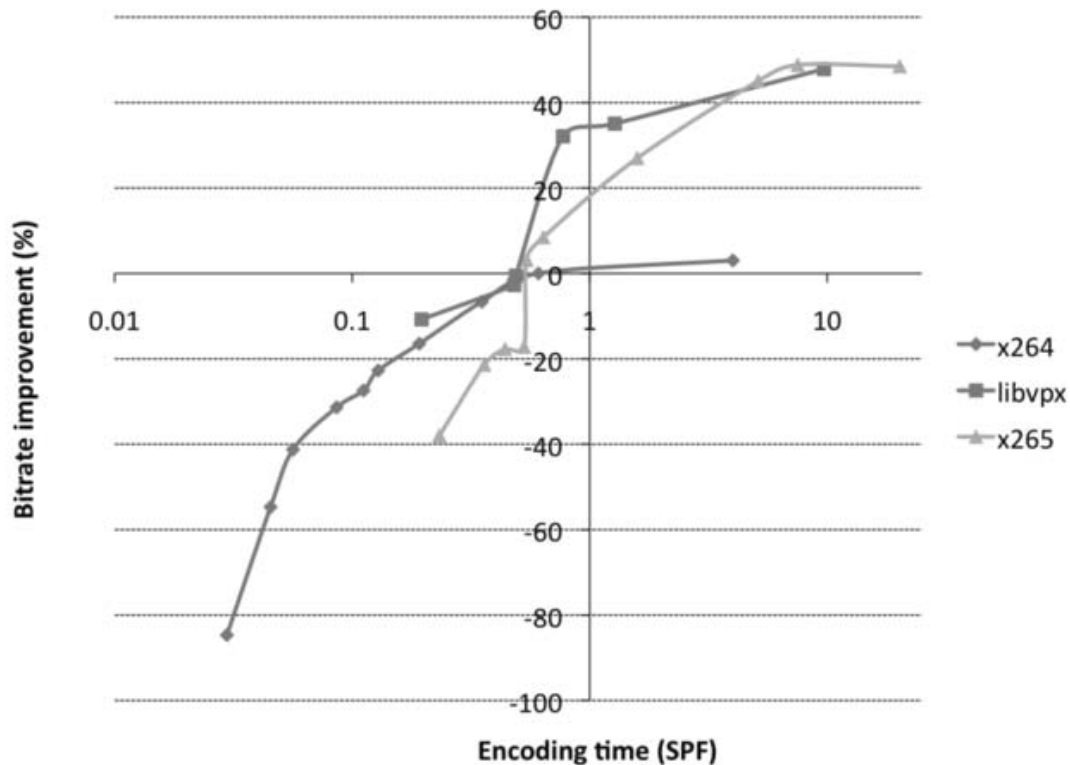


Abb. 24: Vergleich der Codier-Effizienz in Abh. von Encodierzeit⁹⁹

6 UHD-Kameras

Nachdem UHD mit seinen bisherigen Spezifikation vorgestellt und zu den bislang verbreiteten Videostandards ins Verhältnis gesetzt wurde, geht es in den folgenden Kapiteln um die aktuelle Relevanz, sowie um eine Einschätzung kommender Entwicklungen. Die UHD-Technologie dringt zunächst in einzelnen Produktsegmenten auf den Markt. Dass eine entsprechende Infrastruktur bislang allerdings noch nicht existiert, interessiert die Elektronikhersteller dabei offenbar nicht. Oft vergleichen Branchenvertreter den Umstieg von HD auf UHD mit dem damaligen Schritt von SD auf HD. Der entscheidende Unterschied besteht allerdings darin, dass bezahlbare Consumer- Endgeräte bereits jetzt schon zur

⁹⁹ Quelle: <https://blogs.gnome.org/rbultje/2015/09/28/vp9-encodingdecoding-performance-vs-hevch-264/>, Abruf am 30. März 2016

Verfügung stehen, während bei der HD-Umstellung entsprechende Kameras beispielsweise aufgrund ihrer Preise in der Anfangsphase nur dem Profi-Segment vorbehalten waren.

Natürlich ist die Frage berechtigt, warum ein Video in 4K aufgenommen werden soll, wenn es letztlich nur auf einem HD-Monitor betrachtet wird, bzw. welchen Weg ein 8K-Videostrom nehmen soll, um zukünftig den Betrachtern präsentiert zu werden. Die Zukunftssicherheit von Videomaterial ist ein sehr verbreitetes Argument. Es gibt allerdings gerade im anspruchsvollen szenischen Bereich weitere Gründe, die für UHD-Formate sprechen, auch wenn die Auswertung zunächst in HD stattfindet. Der wesentlichste Vorteil dabei ist der höhere Spielraum in der Postproduktion, der sich dadurch ergibt, wenn ein Bild in einer vielfachen Auflösung gegenüber dem Zielformat vorliegt. Alle Bearbeitungsschritte, die direkt mit der Manipulation des Videorohmaterials zu tun haben (z.B. Retusche, Farbkorrektur, Bildausschnittsveränderungen), können präziser durchgeführt werden und sind mit einem geringeren, bzw. nicht wahrnehmbaren Qualitätsverlust verbunden.

Unter Berücksichtigung der eingeführten Anforderungen an UHD soll im folgenden ein Marktüberblick über aktuelle technische Möglichkeiten auf dem Kamerasektor gegeben werden. Die entscheidende Frage dabei, lautet, inwiefern die Hersteller tatsächlich die vorgestellten UHD-Parameter erfüllen.

6.1 Aktuelle Marktübersicht

Im folgenden willkürlichen Überblick sind einige aktuelle Kameramodelle verschiedener Hersteller gelistet, die mit UHD-Auflösung (zumeist 4K) aufzeichnen können. Um eine gewisse Vergleichbarkeit zu schaffen, werden die Kameras¹⁰⁰ in die Kategorien „Consumer“, „Semiprofessionell“ und „Professionell“ eingeteilt. Es bestehen darüberhinaus weitere Unterschiede, wie z.B. die Sensorgröße. Auf wesentliche Parameter muss deshalb im Einzelfall am Beispiel eingegangen werden, da eine weitere Kategorisierung nicht praktikabel ist.

¹⁰⁰ korrekterweise handelt es sich um Camcorder, da das Videosignal direkt im Gerät aufgezeichnet wird

Kameramodell	Videospezifikation
Sony Cybershot DSC RX100 IV	MPEG-4/H.264, 30fps,
Panasonic Lumix DMC-FZ1000	MPEG-4/H.264, 25fps
GoPro Hero4 Black	MPEG-4/H.264, 30fps
Panasonic HX-A500	4K, 25fps
Sony Alpha 7S	4K, 4:2:2, XAVC
Sony PMW- X70	10Bit, 4:2:2, 50fps

Tabelle 10: Beispiele für Consumer-Kameras

Kameramodell	Videospezifikation
Black Magic Design Production Camera 4K	ProRes, RAW CinemaDNG, int.SSD-Rekorder,
Panasonic Lumix GH 4	4K, 30fps, 10 Bit, 4:2:2
Sony PXW-FS7	4K, 10Bit, 4:2:2, (auch ProRes 4:2:2)

Tabelle 11: Beispiele für semiprofessionelle Kameras

Kameramodell	Videospezifikation
Aja Cion	120fps, intern 60fps, UHD-1, intern 12-Bit, ProRes
RED Epic Dragon	6K, 1000fps, 4K, REDRaw, max. 150fps, 16 Bit, komprimiert mit Wavelet
Sony PMW-F5/ F55	4K, XDCAM 4:2:2,
Sony PMW-F65	4K, 16Bit RAW, 120fps, 5Gbit/s
BlackMagic URSA	4K, 12Bit, DNG-RAW/ProRes, 25, 50 fps, 6G-SDI
Arri Alexa 65	6K, ArriRAW, 60fps
Panasonic Varicam 35	120fps in 4K, ProRes 4:4:4:4, ProResHQ
Grass Valley LDX 86 Universe	
Vision Reserch Phantom Flex 4K	4K 1000fps, max 64GB Pufferspeicher
Ikegami SHK 810	8K

Tabelle 12: Beispiele für professionelle Kameras

Der Überblick beinhaltet sowohl Consumermodelle, als auch digitale Film- und Broadcastkameras, die im Jahr 2016 verfügbar sind. Dabei werden einige Aspekte deutlich, die sich aus den bisherigen Betrachtungen ergeben. UHD-1 hat wie schon angesprochen mittlerweile sogar im Kamerabereich den Consumer-Markt erreicht. Zwar bestehen nach wie vor Einschränkungen. Die für UHD niedrigen Frameraten von 30 Hz führen z.B. dazu, dass die entsprechenden Kameras nicht gut geeignet, um schnelle Bewegungen einzufangen (siehe Kapitel 5.2). Aus Marketinggesichtspunkten lässt sich die hohe Pixelzahl im Consumerbereich wahrscheinlich noch besser verkaufen als eine hohe Framerate und auch wenn die Spezifikationen noch nicht einer für die Zukunft definierten Norm unterliegen, ebnet sich an dieser Stelle der Weg für die neue Technologie.

Im professionellen Bereich existieren erste Kameramodelle, die höhere Frameraten bei einer 4K-Aufzeichnung (z.B. Sony F65¹⁰¹) zulassen, bzw. in höheren Auflösungen als 4K aufzeichnen. Andere Geräte besitzen zwar einen 4K-fähigen Sensor, können allerdings intern nur HD aufzeichnen. Zur UHD-Aufnahme wird ein externer Rekorder notwendig, der über eine entsprechende Schnittstelle angebunden wird. Der Hersteller Sony verfolgt mit seinen beiden Modellen PMW F5 und PMW F55 einen anderen Kurs, denn hier ist der Funktionsumfang im Wesentlichen über die installierte Firmware realisiert. Die in Standardkonfiguration ausgelieferte F5-Kamera kann intern kein 4K-Signal aufzeichnen. Dass die Hardware dazu allerdings in der Lage ist, zeigt das später von Sony angebotene kostenpflichtige Upgrade der Firmware, die dem Nutzer diese Funktionalität freischaltet.¹⁰² Einen weiteren nicht mehr aktuellen Weg ging JVC bei der ersten Generation von 4K-Camcordern. Bei dem Modell HY-HM10E wird der 4K-Sensor in vier HD-Quadranten unterteilt. Die vier HD-Streams werden separat auf vier SDHC-Karten aufgezeichnet und mussten im Schnittprogramm wieder zusammengeführt werden¹⁰³. Mittlerweile gibt es Schnittstellen, mit denen 4K-Signale über eine Leitung übertragen werden können (siehe Kapitel 7). Der amerikanische Kamerahersteller RED, der sich mit seinen Kameras eher an filmischen Produktionen orientiert, hat momentan mit der Epic Dragon ein Modell im Portfolio, das Auflösungen von 6K aufzeichnet. Das entspricht der 9-fachen HD-Auflösung, ist

¹⁰¹ Die F65 verfügt sogar über einen 8K-Sensor, der mit 4K ausgelesen wird.

¹⁰² Vgl. <http://www.sony.de/pro/product/CBKZ-55FX/>, Abruf am 5. 3. 2016

¹⁰³ Vgl. Film-TV-Video-1 2014, S. 10

aber kein Bestandteil der UHD-Norm. Bei der Aufzeichnung kommt eine proprietäre Wavelet-Codierung zum Einsatz, die Bilder bei höheren Frameraten stärker komprimiert, um die Datenrate zu begrenzen.

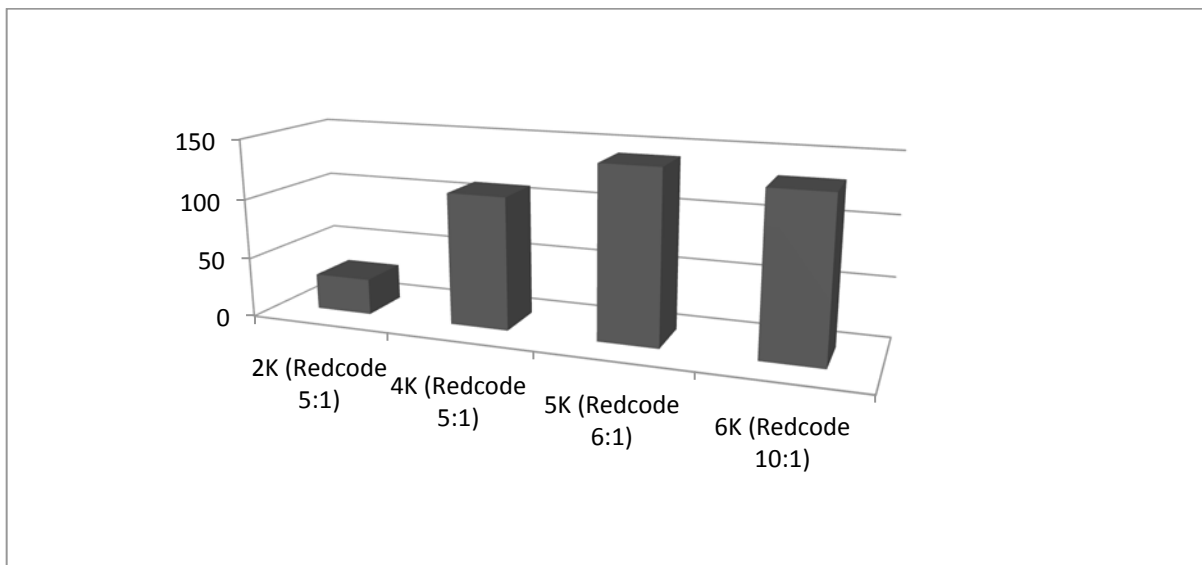


Abb. 25: Vergleich der Datenraten in MB/s von RED-RAW-Videodateien unterschiedlicher Auflösung

Bei den in der Abbildung dargestellten Werten handelt es sich um Berechnungswerte aus aufgezeichneten RED-Videodateien verschiedener Auflösungs-Modi bei einer konstanten progressiven Framerate von 50Hz. Während die Datenrate von 2K bis 5K mit steigender Auflösung erwartungsgemäß ebenfalls steigt, sinkt sie bei 6K wieder etwas. Das liegt an der im jeweiligen Modus verfügbaren Kompressionsstufe. Es wurden in dem Beispiel jeweils die niedrigsten möglichen Kompressionsraten verwendet. Bei voller Sensorauflösung von 6K HD beträgt diese allerdings 10:1 (im Vergleich dazu bei 2K 5:1). An dieser Stelle wird deutlich, dass die höhere Auflösung nicht unbedingt eine höhere Qualität bedeuten muss, da sie hier z.B. auf Kosten von Farbauflösung realisiert wird, um die Datenraten in den Griff zu bekommen.

Kameramodelle, die die UHD-2-Norm erfüllen, sind aktuell kaum verfügbar. Im Broadcastbereich hat Ikegami mit der SHK 810 eine Kamera vorgestellt, die 8K-Aufnahmen für Broadcast-Anwendungen ermöglicht. Die japanische Technologievereinigung NHK hat mit seiner Hi Vision 8K ebenfalls ein erstes Modell im Portfolio, das zudem mit einer Bildrate von 120Hz arbeitet und dazu mittlerweile sogar den neuen Codec H.265 (siehe Kapitel 5.7) verwendet. Es ist zu erwarten, dass auf der Fachmesse NAB im April 2016 einige weitere Hersteller mit 8K-Kameras aufwarten werden.

6.2 Spezielle Objektive für UHD

Im Consumer-Bereich, wo häufig mit nicht wechselbaren Systemobjektiven oder Fotoobjektiven gearbeitet wird, stellt sich die Frage nach speziellen UHD-Objektiven noch nicht vordergründig. Generell sind hochwertige Fotoobjektive (z.B. Canon L-Serie oder Nikon Nikkor) durchaus für UHD-geeignet, was die optische Abbildungsleistung angeht. Nachteile entstehen durch Eigenschaften, die in der Fotografie, für die sie ursprünglich entwickelt worden sind, keine Nachteile bringen. So handelt es sich bei vielen Fotoobjektiven um sogenannte Variofocalobjektive, bei denen sich die Fokusebene beim Zoomen verändert. Außerdem variiert beim Scharfstellen der Bildausschnitt leicht.¹⁰⁴ Nur hochwertige Filmobjektive sind so konstruiert, dass diese bei Bewegtbild relevanten Faktoren berücksichtigt werden. Generell können an UHD-Sensoren weiterhin HD- oder Filmobjektive verwendet werden. Entscheidend ist, dass der Mount und damit das Auflagemaß von Objektiv und Kamera identisch ist, allerdings erreichen analoge Filmobjektive, die heute häufig in Verbindung mit digitalen UHD-Kameras eingesetzt werden, nicht die maximal durch den Sensor mögliche Schärfe, da ein digitaler Sensor nicht wie Filmemulsionen in Schichten aufgebaut ist, sondern eher einer Ebene gleicht, wie aus der Abbildung hervorgeht.

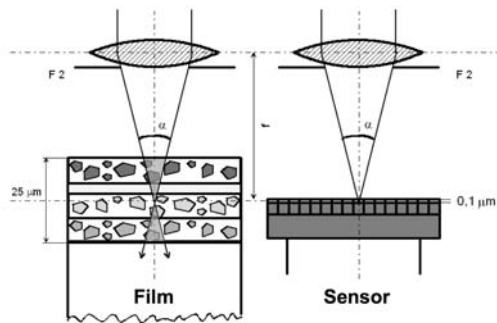


Abb. 26: Vergleich von Film- und Sensorbelichtung¹⁰⁵

Eine optimale optische Abbildungsleistung erreicht man daher mit „Digital-Objektiven“. Man bezeichnet diese Objektive als „telezentrisch“. Sie haben kleinere Toleranzbereiche, was die Bildweite angeht. Neben einer höheren Schärfe zeichnen sie sich weiterhin durch weniger chromatische und sphärische Aberrationen und geringere Abdunklungen an den Bildrändern¹⁰⁶ aus. Chromatische Aberrationen entstehen durch unterschiedliche Brechungsindizes in Abhängigkeit der Farbe (Frequenz). Sphärischen Aberrationen sind

¹⁰⁴ Focus Breathing-Effekt

¹⁰⁵ Quelle: Slansky 2015, S.

¹⁰⁶ Fall Off-Effekt

durch die unterschiedlichen Brechungseigenschaften von Linsen in Mitten- und Randbereichen begründet.

Die Frage, ob nun spezielle Objektive für UHD-Aufnahmen erforderlich sind, kann pauschal nicht beantwortet werden, da gerade im filmischen Bereich besonders gern alte Objektive wegen ihres individuellen Bokeh-Effektes¹⁰⁷ verwendet werden. Zu diesem Fazit kam Prof. Dr.-Ing. Peter Slansky¹⁰⁸ während des Kolloquiums zu diesem Thema im Mai letzten Jahres.¹⁰⁹

6.3 Problematik der Bildwandlung

Generell ist festzuhalten, dass alle Kamerahersteller derzeit auf Multiformatlösungen setzen. Das bedeutet, dass die Kameras neben UHD, auch HD und sogar teilweise noch SD als Aufnahmeformate zulassen. Dazu wird ein und der selbe Sensor genutzt. Das ermöglicht den Anwendern zwar eine hohe Flexibilität, ist allerdings immer mit Kompromissen verbunden, da die in Videokameras verwendeten optischen Anti-Aliasing-Filter an eine bestimmte Auflösung gebunden sind. Diese optischen Tiefpassfilter dienen der Aperturkorrektur¹¹⁰ und damit der Einhaltung des Shannonschen Abtasttheorems. Bei digitalen Bildwandlern kann ein Filter folglich nur in einer festgelegten Auflösung (UHD 1, UHD 2, HD oder SD) optimal arbeiten. Ist er für beispielsweise für UHD 1 optimiert und man zeichnet ein Video in HD auf, können feine Strukturen im Bild Aliasingartefakte aufweisen. Wenn umgekehrt ein an HD angepasster Filter bei einer UHD- Aufzeichnung verwendet würde, wird das Bild weichgezeichnet. Es ist sicherlich akzeptabler ein UHD-Filter für eine HD-Aufnahme zu verwenden, allerdings sollte man dann feine Strukturen im Bild möglichst vermeiden. Die Aliasing-Effekte durch nicht optimierte Filter treten nur dann auf, wenn in den unterschiedlichen Aufnahmeformaten immer der gesamte Sensor genutzt wird¹¹¹. Ein anderes Verfahren von UHD- Kameras arbeitet mit der Verkleinerung des ausgelesenen Sensorbereiches bei geringeren Auflösungen (Windowed Mode). Damit kann der an die maximale Sensorauflösung angepasste Anti-Aliasing-Filter weiterhin optimal arbeiten,

¹⁰⁷ Qualität der Unschärfebereiche, die von der Anzahl der verbauten Blendenlamellen abhängt

¹⁰⁸ Studiendekan der Hochschule für Film und Fernsehen München

¹⁰⁹ vgl. Slansky 2015, S. 62

¹¹⁰ vgl. Schmidt 2005, S. 350, Abs.2

¹¹¹ bei geringeren als der nativen Sensorauflösung werden mehrere Bildpunkte zusammengefasst

allerdings verändert sich bei gleichem Objektiv der Bildausschnitt im Vergleich zur vollen Sensorauflösung¹¹².

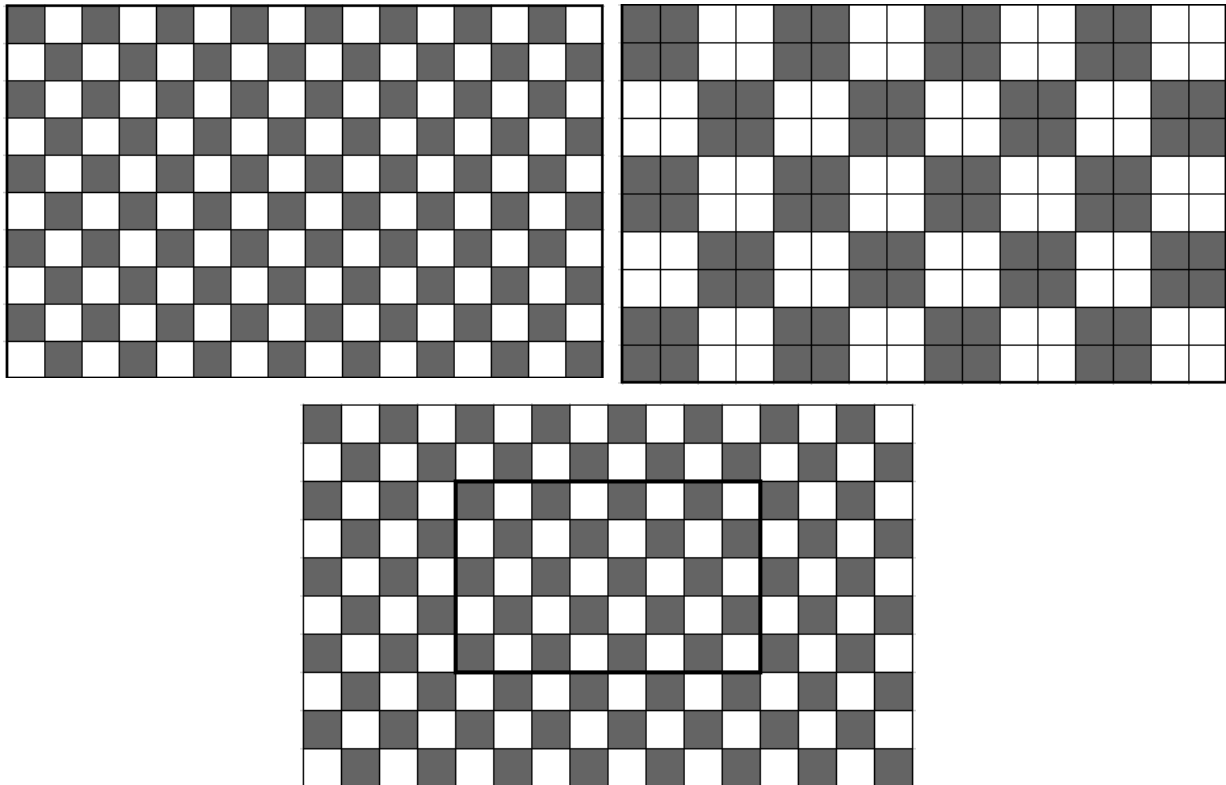


Abb. 27: : Ausleseverfahren von Bildwandlern (Volle Auflösung, reduzierte Auflösung, Windowed Mode)

Durch die verfügbaren hohen Auflösungen sind digitale Kameras mittlerweile sehr tief in einen Markt vorgedrungen, der lange Zeit noch analoger Aufnahmetechnik vorbehalten war. Die Rede ist von Film. Auch wenn die Sensorauflösungen bereits seit längerem durchaus mit analogem Film mithalten können, so ist die Erreichung eines vergleichbaren Dynamikumfangs weiterhin ein großes Problem der in der Digitaltechnik häufig verwendeten CCD-Sensoren, da die Ladungszunahme eines Sensorelements proportional zur Belichtung ist.¹¹³ Bei CMOS-Sensoren hingegen muss die Auswertung des Signalwerte nicht linear erfolgen, was gegenüber CCD-Sensoren einen höheren Dynamikumfang bedeutet.¹¹⁴ Heutige digitale Filmkameras sind aus diesem Grund häufig mit CMOS-Sensoren ausgestattet. Diese bringen jedoch aufgrund ihrer Bauart einen geringeren Signal-Rausch-Abstand mit sich, was für die mitunter erforderlichen kürzeren Belichtungszeiten bei UHD problematisch ist.

¹¹² vgl. Cropping

¹¹³ vgl. Schmidt 2005, S. 378, Abs. 2

¹¹⁴ vgl. Schmidt 2005, S. 326, Abs. 1

6.4 Aufzeichnungsarten

6.4.1 Videoaufzeichnung

Die Aufzeichnungsart von Video hängt sehr vom Verwendungszweck und der weiteren Verarbeitung ab. Im Consumer- Bereich und im Live-Betrieb findet in aller Regel keine aufwendigere Nachbearbeitung der Videodaten statt. Hier geht es darum, auf dem Speichermedium oder am Signalausgang der Kamera ein Videobild zu erhalten, das in Farbigkeit und Kontrast stimmig ist und die aufgenommene Szenerie gut dargestellt wird. Die Videoaufzeichnung ist hier immer an einen bestimmten vordefinierten Farbraum (bei HD: Rec.709) gebunden und funktioniert nach dem What-you-see-is-what-you-get-Prinzip. Bei UHD-1 erhöht sich die Datenrate bei dieser Aufzeichnungsart theoretisch um das Vierfache¹¹⁵ im Vergleich zu HD. In der Praxis reduziert sich diese Datenrate allerdings durch neue Codecs (siehe Kapitel 5.7). Die Limitierung bei dieser Aufzeichnungsart besteht in der Festlegung auf eine Farbtemperatur, sowie der Einschränkung des Belichtungsspielraumes. Wenn eine Postproduktion des gedrehten Videomaterials geplant ist, empfiehlt sich die Aufzeichnung von Video nicht.

6.4.2 RAW-Aufzeichnung

Wenn eine aufwendige Nachbearbeitung des Videomaterials geplant ist, bietet eine Aufzeichnung der Sensorrohdaten (RAW) größtmöglichen Spielraum für die Postproduktion. RAW-Dateien sind grundsätzlich keine Videodateien. Ihre Aufzeichnung kommt vor allem bei Ein-Sensor-Kameras¹¹⁶ zur Anwendung. Dabei befindet sich eine sogenannte Bayer-Matrix vor dem Sensor. Das ist ein optischer Filter, der in der Regel zu 50% für Grün durchlässig ist und zu je 25% für Rot und Blau. Diese Verteilung steht im engen Zusammenhang mit der menschlichen Wahrnehmung (siehe Kapitel 3.1). Da für jedes Pixel nur Helligkeiten entsprechend des vorgesetzten Filters detektiert werden, entsteht zunächst ein unvollständiges Bild, in dem 50% der Grünwerte und je 75% der Rot- und Blauwerte fehlen.

¹¹⁵ hier wird gleiche Bildrate vorausgesetzt

¹¹⁶ Single-Large-Sensor-Kamera (SLS-Kamera)

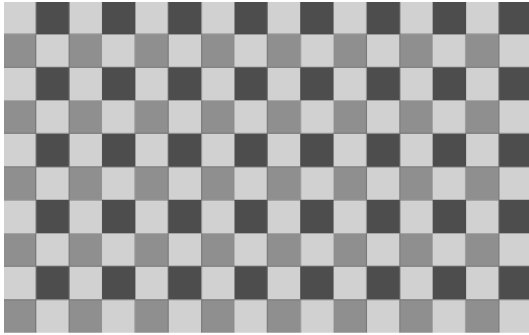


Abb. 28: Bayer-Matrix

Diese tatsächlich aufgezeichneten Sensordaten werden als RAW-Daten bezeichnet. Um aus ihnen ein Videobild zu generieren, verwenden die Kamerahersteller unterschiedliche Algorithmen, denen verschiedene Annahmen über einen Bildinhalt zugrunde liegen. Diesen Interpolationsprozess bezeichnet man als De-Bayering. Der Hersteller Sony ging mit seinem Kameraspitzenmodell PMW-F65 sogar soweit, dass man intern einen 8K-Sensor verbaute, zunächst aber nur ein De-Bayering-Algorithmus für 4K zur Verfügung stellte. Durch einen später eingeführten Algorithmus können aus den bereits in Vergangenheit aufgezeichneten RAW-Daten bereits heute im Nachhinein 6K-Videos, zukünftig sogar 8K-Videos gewonnen werden.¹¹⁷

Um während einer Videoaufnahme ein Live-Bild auf einem Monitor darzustellen, ist es erforderlich, das De-Bayering in Echtzeit durchzuführen, was bei UHD rechenintensiv ist.¹¹⁸ Da RAW-Daten häufig keiner verlustbehafteten Kompression unterlegen sind, entstehen sehr hohe Datenraten. Eine Sony PMW-F65-Kamera erreichte in einem Test¹¹⁹ etwa eine Datenrate von 250MB/s in der RAW-Aufzeichnung¹²⁰. Solche Datenmengen verlangen nach großen Speicherlösungen, und sind auch in der Weiterverarbeitung mit hohen technischen Ressourcen verbunden. Um die Datenrate an die Bedürfnisse der Produktion anzupassen, bietet der amerikanische Kamerahersteller RED für seine RAW-Daten verschiedene

¹¹⁷ vgl. Sony Pro: <http://pro.sony.com/bbsc/ssr/show-highend/resource.solutions.bbsscems-assets-show-highend-f65camera.shtml>, Abruf am 6. 3. 2016

¹¹⁸ 4K-Special I 2014, S. 6

¹¹⁹ im Dezember 2015 eigens durchgeführt in der Firma Greenhouse Production GmbH in Kooperation mit Ludwig Kameraverleih

¹²⁰ F65RAW SQ-Format

Kompressionsstufen¹²¹ an, die allerdings verlustbehaftet sind, wie bereits erwähnt wurde. Für intensivere Postproduktionsprozesse erwiesen sich dort Kompressionsraten höher 6:1 als nicht brauchbar, da sich bereits bei leichten Farbkorrekturen ein Chrominanzrauschen zeigte. Farbanpassungen verursachten dabei ein sichtbares und störendes Rauschen im Videobild, was im konkreten Fall zum Ergebnis hatte, dass 6K-Aufnahmen mit 50Hz mit der RED-Kamera nicht als Aufzeichnungsformat genutzt wurden. Stattdessen wurde auf 4K zurückgegriffen, was aufgrund der geringeren Kompression sogar eine vergleichbare Datenrate wie 6K produzierte.¹²² Wenn die Datenrate bereits bei der Aufnahme beschränkt werden soll, ist RAW nicht die optimale Lösung, da sehr viel Speicher notwendig und die Verarbeitung der Daten rechenintensiv. Es existiert hierfür eine bessere Variante, die versucht die Vorteile der Videoaufzeichnung (relativ geringe Datenrate) und der RAW-Aufzeichnung (möglichst großer Spielraum zur Nachbearbeitung) zu vereinen. Dieses Verfahren nennt sich Log-Aufzeichnung.

6.4.3 Log-Aufzeichnung

Bei der Log-Aufzeichnung werden Videosignale nicht linear, sondern logarithmisch aufgezeichnet. Dabei entspricht eine Verdopplung des auf den Sensor treffenden Lichtes nicht mehr einer Verdopplung der Ausgangsspannung. Je nach Belichtungssituation und gewünschtem Ergebnis, bieten die Kamerahersteller unterschiedliche Gammakurven zur Aufzeichnung an. Der große Vorteil dieser Kurven ist, dass der Dynamikbereich des Sensor besser ausgenutzt wird. Um ausgangsseitig in den durch den definierten Farbraum gegebenen Grenzen zu bleiben, findet z.B. eine Kompression in den hellen Bildbereichen statt, während die Mitten (z.B. Hauttöne) weitestgehend linear aufgezeichnet werden.

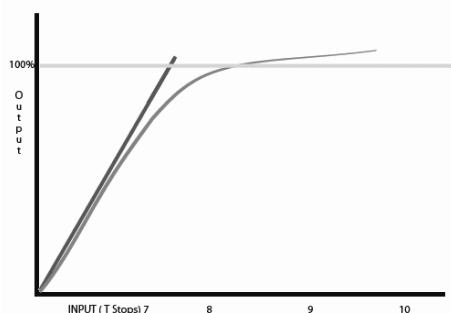


Abb. 29: Lineare und logarithmische Gammakurve im Vergleich

¹²¹ Zur Anwendung kommt eine Wavelet-Codierung

¹²² im Februar 2015 eigens durchgeführt in der Firma Greenhouse Production GmbH

Die Nutzung logarithmischer Videosignale liefert mehr Spielraum in Postproduktion und erhöht den aufgezeichneten Kontrastumfang. Im Gegensatz zur in Kapitel 6.4.1 beschriebenen Videoaufzeichnung ist bei der Arbeit mit Log-Daten, ähnlich wie bei einer RAW-Aufzeichnung eine Nachbearbeitung erforderlich, um ein natürlich wirkendes Videobild zu erhalten. Ein unbearbeitetes Log-Bild erscheint zunächst sehr kontrastarm und flau. Zur korrekten Darstellung des Videosignals beim Dreh (z.B. auf Regie-Monitor) nutzt man sogenannte Look Up Tables (LUT)¹²³. Dabei handelt es sich um Zuordnungstabellen, die dazu dienen, eine ungefähre Vorschau des später in der Postproduktion farbkorrigierten Materials direkt vor Ort zur Verfügung zu stellen. Im einfachsten Fall ist eine LUT eine Umkehrung der eingesetzten LOG-Kurve, dass am Monitor wieder ein lineares Signal zur Verfügung steht (z.B. Rec.709). Bei einer solchen einfachen Entzerrung wird allerdings nicht der gesamte aufgezeichnete Dynamikumfang dargestellt. Aus diesem Grund macht es für den Kameratechniker Sinn zur korrekten Belichtung auch direkt das kontrastarme LOG-Video zu betrachten. Viele Kameras bieten dazu die Möglichkeit, zwischen den Signalen hin-und her zuschalten oder bieten mehrere Videoausgänge, die jeweils separat belegt werden können.

6.5 Aufzeichnungsmedien und -formate

In der Aufzeichnung der Videodaten gehen die Hersteller verschiedene Wege. Um die hohen Auflösungen der Sensoren zu verarbeiten, werden die Daten vor ihre Speicherung codiert. Diese Anforderlichkeit zeigt sich am Beispiel des CMOS-Sensors einer Sony F65-Kamera, der eine native 8K-Auflösung besitzt und während der Aufnahme kameraintern eine Datenrate von 34,8Gbit/s erzeugt.¹²⁴ Dieser enorme Datendurchsatz wird von den meisten UHD-Kameras zwar noch nicht erreicht, aber auch dort ist eine Codierung und damit verbundene Kompression nötig, um die Daten ökonomisch auf verfügbaren Speichermedien unterzubringen oder live zu übertragen. Zwar haben sich die Geschwindigkeit und die Kapazität von verfügbarem Speicher in den letzten Jahren sehr erhöht, allerdings ist auch der Bedarf durch UHD im Verhältnis dazu stärker gestiegen, wie folgende Übersicht demonstriert.

¹²³ aus dem Englischen: Umsetzungstabellen

¹²⁴ vgl. XAVC-Whitepaper, S. 3 SDXC UHS-Class 3

Videostandard	Datenrate unkomprimiert	Beispiel Speichermedium für komprimierte Aufzeichnung	Max. Schreibgeschw.
SD (10Bit)	270Mbit/s	Panasonic P2	100 Mbit/s
HD (10Bit)	1,4 Gbit/s	SDXC UHS-Class 3	240Mbit/s
		SXS Pro	400 Mbit/s
		HDCAM SR	440Mbit/s
UHD-1 (10Bit)	8,3 Gbit/s	RED SSD	1,4 Gbit/s
		SXS Pro +	1,5Gbit/s
UHD-2 (10Bit, 120fps)	79,6 Gbit/s	CFast 2.0	3,4 Gbit/s
		SRRMemory	5,5 Gbit/s

Tabelle 13: Gegenüberstellung von Videodatenraten und Speichergeschwindigkeiten

In ihr sind beispielhaft die unkomprimierten Datenraten der jeweiligen Videonorm und jeweils gängige Schreibgeschwindigkeiten von Speichermedien für eine komprimierte Aufzeichnung einmal gegenübergestellt. Die unkomprimierten Datenraten erhöhen sich von SD zu UHD-2 um den Faktor 295, während geläufige Speichermedien im Vergleich dazu nur einen Sprung um den Faktor 51 erleben. Dazu muss angemerkt werden, dass 8K mit 120 Frames zwar momentan noch nicht produziert wird, allerdings sind die hier herangezogenen 10Bit auch noch nicht die Spitze des derzeit als Ziel Definierten ist. Mit 12Bit quantisiert beträgt die Netto-Datenrate von 8K-Video (nach UHD-2) sogar 95,6Gbit/s. In modernen Kameras kommen mittlerweile ausschließlich Flashspeicher verschiedener Kategorien zum Einsatz. Der große Vorteil dieser Speicher ist ihre Unempfindlichkeit gegenüber mechanischen Stößen, wie sie bei Kameras abhängig vom Einsatzgebiet häufig auftreten. Darüberhinaus spielen auch die Kompaktheit und Speichergeschwindigkeit eine große Rolle. Da die Aufzeichnungen in aller Regel nur temporär auf Flash-Speicher erfolgt und nicht darauf archiviert wird, spielt die im Vergleich zu HDDs geringere Kapazität keine große Rolle. Es ist im professionellen Einsatz unter Umständen sogar von Vorteil, wenn die Aufzeichnungsmedien (Speicherkarten) häufiger gewechselt werden können und zwischenzeitlich eine Datensicherung (z.B. auf HDD-RAID) vorgenommen werden kann.

6.5.1 SDHC-und SDXC-Karten

Bei SD-Karten handelt es sich um ein 2001 von der Firma Sandisk entwickeltes Speicherformat. SD steht dabei für Secure Digital und bezieht sich auf die Hardware-Funktion zur digitalen Rechteverwaltung (DRM), durch die es verhindert werden sollte, dass

geschützte Medieninhalte ungeschützt weitergegeben werden. Erste SD-Karten verfügten über Speicherkapazitäten von 8MB bis 2GB. Die mittlerweile sehr verbreiteten SDHC¹²⁵-Karten erreichen Kapazitäten bis 32GB. Bei diesen Karten erfolgt zusätzlich eine Einteilung nach Schreibgeschwindigkeiten in Leistungsklassen. Damit sind diese Klassen von größerer Bedeutung für Videoaufzeichnung als die Kapazität. Es existieren die Klassen 2, 4, 6 und 10, wobei die Ziffern die Mindestschreibgeschwindigkeit in MB/s bezeichnen. Die jüngste Generation von SD-Karten trägt die Bezeichnung SDXC¹²⁶ und erreicht momentan Kapazitäten bis 512GB und bis zu 95MB/s Schreibgeschwindigkeit über den UHS-I-Bus.¹²⁷ Theoretisch erlaubt die Spezifikation von SDXC eine Kapazität bis 2TB. Solche Karten sind auf dem Markt noch nicht verfügbar. Geplant sind Karten, die Schreibgeschwindigkeiten bis 2,3Gbit/s über UHS-II erreichen. Bei SD-Karten wird der Zugriff auf den Speicher durch einen Controller gesteuert, der sich auf der Karte befindet. Der Preis pro GB beträgt bei SDXC-Karten 0,55€/GB, was die starke Ausrichtung auf den Consumer-Markt unterstreicht. Allerdings bleibt die damit erreichbare Schreibgeschwindigkeit unter 100MB/s.

6.5.2 SXS Pro+-Karten

Bei diesen Karten handelt es sich um ein von dem Elektronikhersteller Sony in Kooperation mit dem Speicherproduzenten Sandisk entwickeltes Format. Es erlaubt Schreibdatenraten bis 2,8Gbit/s und verfügt darüberhinaus über einen Mechanismus zur Ausfallsicherheit, der im Falle eines plötzlichen Stromausfalls während der Aufzeichnung die beschädigte Videodatei reparieren kann.¹²⁸ Als Schnittstelle fungiert der PCIe-Standard, der in seiner aktuellen Version 3 pro Lane eine Datenrate bis zu 985MB/s erlaubt und damit sicher nicht der Flaschenhals bei der Datensicherung darstellt, da die Lesegeschwindigkeit von SXS Pro+

¹²⁵ HC: high capacity (aus Englischem: hohe Kapazität)

¹²⁶ XC: eXtended capacity (aus Englischem: erweiterte Kapazität)

¹²⁷ vgl. <https://www.sdcard.org/join/faq/index.html>, Abruf am 13. 11. 2015

¹²⁸ vgl. Sony Professional: <http://www.sony.de/pro/article/broadcast-products-ultra-fast-sxs-pro-memory-cards-transform>, Abruf am 29. 3. 2016

maximal 3,5Gbit/s beträgt. Die Kapazitäten der Karten betragen 64, 128, bzw. 256GB. Der Preis pro GB beträgt hier ca. 6,70€. ¹²⁹

6.5.3 CFast 2.0-Karten

Die maximale Schreibgeschwindigkeit der 128GB großen Karten beträgt bis zu 3,4Gbit/s, für die 64GB-Version 1,9Gbit/s. Als Schnittstelle wird SATA genutzt, was die Karten inkompatibel zu klassischen CF-Karten macht, da diese IDE nutzen. Die maximale Lesegeschwindigkeit beträgt 4Gbit/s, was einer schnellen Datensicherung zugute kommen kann. Der Preis pro GB beträgt ca. 2,30€ ¹³⁰

6.5.4 REDMAG 1.8" SSD

Der amerikanische Kamerahersteller RED bietet zur Aufzeichnung proprietäre SSDs an, die eine Schreibdatenrate bis zu 2,3Gbit/s erlauben. Der Nettopreis für eine solche SSD mit einer Kapazität von 240GB beträgt 1400€ ¹³¹. Da RED ausschließlich die Verwendung der eigenen Medien zulässt, relativiert sich der vergleichsweise niedrige Einstiegspreis für Kamerabodies an dieser Stelle wieder mit einem Preis pro GB von 5,80€.

6.5.5 Sony SRMemory

Um Videodaten in höchster Sensorauf Auflösung in RAW aufzeichnen zu können, setzt Sony auf externe Rekordereinheiten, die als Medien das SRMemory-System nutzen. Der Preis pro GB von 9,80€ grenzt sich klar vom Consumer-Bereich ab. ¹³² Das System leistet dafür eine Schreibdatenrate von 5,5Gbit/s.

¹²⁹ vgl. http://www.marcotec-shop.de/de/products/cat_222/detail_7921.htm?gclid=COqZ46aA5ssCFQeVGwoddZwM1A, Abruf am 29. März 2016

¹³⁰ vgl. http://www.mindfactory.de/product_info.php/64-GB-Lexar-Professional-CFast-TypII-3500x-Retail_1032571.html, Abruf am 29. März 2016-03-29

¹³¹ vgl. <http://de.red.com/store/products/redmag-ssd>, Abruf am 29. März 2016

¹³² vgl. http://www.bhphotovideo.com/c/product/891528-REG/sony_sr_1ts55_1tb_s55_series_srmemory.html, Abruf am 29. März 2016

6.5.6 PhantomFlex – interne RAM-Aufzeichnung

Zuletzt soll in der Reihe der Aufzeichnungsmedien die Highspeedkamera Phantom Flex 4K des Herstellers Vision Research genannt werden, da sie einen interessanten Weg geht, was das Handling extrem hoher Datenraten angeht. Die Kamera ist mit einem internen RAM-Ringspeicher ausgestattet, der fortlaufend beschrieben wird. Die Kamera kann in 4K mit bis zu 1000 Bilder pro Sekunde im RAW-Format aufzeichnen. Ab dem Moment des Auslösens (Trigger) werden keine Daten mehr gelöscht und die Aufnahme wird fortgesetzt, bis der Speicher voll ist. Die RAM-Größe beträgt dabei maximal 128GB, was bei 3840p1000 für eine Aufzeichnungslänge von 10 Sekunden ausreicht. Danach müssen die RAW-Daten vom RAM auf einen Flashspeicher kopiert und der RAM anschließend wieder freigegeben werden, bevor eine neue Aufnahme ausgelöst werden kann. Der Datendurchsatz der Videodaten beträgt 8GB/s. Dieser Durchsatz liegt immer noch unter dem, was bis heute maximal als UHD-2 definiert worden ist. Es verdeutlicht allerdings, wie weit die aktuell verfügbare Speichertechnik noch davon entfernt ist von der Umsetzung dessen, was in der UHD-Norm bereits definiert wurde.

Um die Diskrepanz zwischen der Schreibgeschwindigkeit verfügbarer Speichermedien und Videodatenrate zu lösen, verwenden alle Kamerahersteller Codecs. Durch sie reduziert sich die Datenrate der Dateien signifikant. Dabei kann allgemein davon ausgegangen werden, dass eine höhere Kompression, die zu einer geringeren Datenrate führt, allerdings gleichzeitig nach mehr Rechenleistung im Encoder und Decoder verlangt. Da H.265 (siehe Kapitel 5.7) momentan noch nicht verbreitet ist, greifen die Hersteller bislang zumeist auf eigene H.264-Implementierungen zurück. Das dürfte sich in sehr naher Zukunft allerdings ändern. Selbst wenn Rohdaten vom Sensor ohne De-Bayering aufgezeichnet werden, findet eine Kompression der Daten statt. Im Folgenden wird ein Überblick über die in Bezug auf UHD-Produktionen wichtigsten Codecs und Formate gegeben.

6.5.7 XAVC

XAVC ist ein von der Firma Sony entwickelter Codec, der dem Standard H.264-Level 5.2 entspricht.¹³³ Er existiert in den Ausführungen XAVC-I und XAVC-L und unterstützt dabei verschiedene Videoauflösungen. Die Endung *I* steht für *intra* und beschreibt, dass jedes Bild

¹³³ vgl. XAVC-Whitepaper, S. 4

einzelnen kodiert wird, was sich besser für Nachbearbeitungen eignet, da die Einzelbilder nicht in Abhängigkeit voneinander stehen. Bei *L* bezieht sich die Kompression auf mehrere zusammenhängende Bilder, einer *long group of pictures*. (siehe Kapitel 4.3) Die zweite Codec-Variante erreicht eine höhere Kompression, ist allerdings rechenlastiger. Je nach verwendeter Bildrate und Farbabtastung kann die Datenrate eines 4K-Videostroms auf unter 100Mbit/s reduziert werden. Im Vergleich dazu zeichnet die Sony-Kamera PMW-F55 4K-Videos intern intra-frame-codiert mit einer Datenrate bis 600Mbit/s auf. Der Codec unterstützt momentan bis zu 960Mbit/s. An dieser Stelle löst sich auch die aufgezeigte Diskrepanz zwischen Rohvideodatenrate und Speichergeschwindigkeit. 4K-Video (UHD-1) lässt sich mit XAVC-I codiert auf SXS Pro + - Karten aufzeichnen. Die Container bei XAVC befinden sich im MXF-Format. Audiodateien werden im AES3-Format codiert.

Range	Resolution	Frame Rate	Color	Max Bitrate	Intra / Lo
4K	4096x2160 3840x2160	23.98p to 59.94p	4:2:0/8bit to 4:4:4/12bit	960Mbps	Intra Long
HD	2048x1080 1920x1080 1440x1080 1280x720	23.98p to 59.94p 50i/59.94i	4:2:0/8bit to 4:4:4/12bit	440Mbps	Intra Long
Proxy	1920x1080 1280x720 640x360 480x270	23.98p to 59.94p	4:2:0/8bit	28Mbps	Long

Tabelle 14: Überblick XAVC-Formate¹³⁴

Für den Consumer-Bereich existiert eine weitere Variante des Codecs unter der Bezeichnung XAVC-S, die anstelle von MXF-, MP4-Container nutzt und Audiodaten als AAC oder LPCM codiert. Weiterhin wird dabei im Unterschied zu den anderen XAVC- Varianten nur eine Auflösung von bis maximal 3840x2160 unterstützt.

6.5.8 Apple ProRes

Ein unter Kameraherstellern verbreiteter Codec ist Apple ProRes. Beispielsweise kommt er in Kameras von Blackmagic Design zum Einsatz, aber auch beim deutschen

¹³⁴ vgl. ebenda

Kameraproduzenten Arri setzt man auf den ursprünglich von Apple entwickelten Codec.¹³⁵ ProRes gibt es in verschiedenen Ausführungen. Die höchste Qualitätsstufe wird als ProRes 444 XQ bezeichnet und hat bei UHD-1 mit 50 Vollbildern eine Datenrate von 3,5Gbit/s. Neben den drei Farbkanälen, die mit bis zu 12Bit quantisiert werden, stehen bis zu 16Bit für einen Alphakanal zur Darstellung von Transparenz zur Verfügung.¹³⁶

Bildrate	Datenrate in Mbit/s: ProRes 422 Proxy	Datenrate in Mbit/s: ProRes 422 LT	Datenrate in Mbit/s: ProRes 422	Datenrate in Mbit/s: ProRes 422 HQ	Datenrate in Mbit/s: ProRes 4444	Datenrate in Mbit/s: ProRes 4444 XQ
24	145	328	471	707	1061	1591
25	151	342	492	737	1106	1659
30	182	410	589	884	1326	1989
50	303	684	983	1475	2212	3318
60	363	821	1178	1768	2652	3977

Tabelle 15: Vergleich der bislang definierten UHD1-konformen ProRes-Formate (Stand Juni 2014)

Die Codec-Varianten ProRes 422 HQ bis ProRes 4444 XQ zeichnen sich dadurch aus, dass sie visuell identisch zum encodierten Original sind. Anwendungsbezogen kann dabei allerdings mit kleineren Datenraten gearbeitet werden. Für kamerainterne Aufzeichnungen empfiehlt Apple die höchste verlustfreie Implementierung¹³⁷. Erst in den unteren Codecs treten visuelle Differenzen zum Original auf. Solche Einschränkungen werden in Kauf genommen, wenn es um die Erstellung von sogenannten Proxy-Dateien geht. Dabei handelt es sich um kleinere Kopien der Originaldateien, die bei manchen Kameras bereits während der Aufnahme mit erstellt werden. Dadurch ist es zum Beispiel möglich, dass ein aufgenommener Videoclip direkt über die Kamera zur Kontrolle erneut abgespielt werden kann,¹³⁸ ohne dass eine große Originaldatei in voller UHD-Auflösung von der Kamera live konvertiert werden muss. Auch für die spätere Verarbeitung verhältnismäßig großer Videodateien bringen Proxies Vorteile mit sich, da man über einen Offline-Schnitt zunächst nur mit kleinen Daten arbeitet. Dadurch werden Ressourcen geschont. Im Proxy-Workflow

¹³⁵ hier allerdings nur in 2K-Auflösung

¹³⁶ vgl. Apple ProRes-Whitepaper 2014, S.5

¹³⁷ vgl. ebenda

¹³⁸ man spricht auch von Rückspiel

verkürzen sich die Renderzeiten, so dass ein flüssiges Arbeiten auch mit weniger Rechenleistung möglich wird.

6.5.9 Avid DnxHR

DnxHR ist der aktuelle Codec des Softwareentwicklers Avid¹³⁹ und damit der Nachfolger von DnxHD, der nach wie vor im Fernsehbereich große Verbreitung hat. DnxHR unterstützt momentan Auflösungen bis 4K, allerdings ist ein 8K-Support bereits angekündigt.¹⁴⁰

Momentan existieren folgende Spezifikationen des Codecs:

Bezeichnung	Merkmale
DNxHR LB	Niedrige Bandbreite, 8Bit, 4:2:2
DNxHR SQ	Standardqualität, 8Bit, 4:2:2
DNxHR HQ	Hohe Qualität, 8Bit, 4:2:2
DNxHR HQX	Hohe Qualität, 12Bit, 4:2:2, Eignung für UHD-Broadcast
DNxHR 444	Sehr hohe Qualität, 12Bit, 4:4:4, für Kino-Master

Tabelle 16: Überblick über aktuelle DnxHR-Spezifikationen¹⁴¹

Neben Avid-Postproduktionsprogrammen steht der Codec unter anderem auch für Adobe-Produkte wie Premiere Pro und After Effects zur Verfügung.

7 Video-Schnittstellen

Um UHD-Video zu übertragen, sind entsprechende Schnittstellen erforderlich, die vergleichsweise hohe Datenraten unterstützen. Im professionellen Videobereich kommen bis heute an vielen Stellen Kupferkabel mit BNC-Steckern zum Einsatz. Allerdings ist in jüngster Zeit eine Trendwende zu spüren. Zunehmend werden diese speziellen Videoverkabelungen durch universeller einsetzbare IP-basierte Übertragungswege ersetzt. Die Gründe, die dafür sprechen, sowie die Problematik, die damit verknüpft ist, werden in diesem Kapitel näher besprochen. Interessant ist an dieser Stelle sicherlich der Ausbau von Glasfaserleitungen bis „zur Haustür“. Außerdem soll auf den Endkundenmarkt eingegangen werden, wo es darum geht die hochauflösten Videos auf einen Monitor zu übertragen.

¹³⁹ seit Dezember 2014 verfügbar

¹⁴⁰ vgl. <https://www.avid.com/en/avid-resolution-independence>, Abruf am 29. März 2016

¹⁴¹ vgl. <https://www.avid.com/products/avid-dnxhr-and-dnxhd#Avid-DNxHR-for-editors>, Abruf am 29. März 2016

7.1 Serial Digital Interface (SDI) über Koaxialkabel

Serial Digital Interface ist der bis heute im professionellen Videobereich (z.B. Studio oder Ü-Wagen) genutzte Standard zur Verteilung von Signalen. Der physische Kanal ist bei HD ein Koaxialkabel mit einem Wellenwiderstand von 75Ω . Als Steckverbinder kommen sogenannte BNC-Stecker zum Einsatz. Diese bieten den Vorteil, dass Stecker und Buchse eine Dreharretierung besitzen, die die Verbindung mechanisch sichern. Diese sogenannten „BNC-Kabel“ kamen bereits bei analogen FBAS-Übertragungen zum Einsatz. Über SDI können sowohl Digital Composite-, als auch Digital Component-Signale (siehe Kapitel 4.1) übertragen werden.¹⁴² Grundsätzlich handelt es sich bei SDI um eine serielle Übertragungsart, bei der die Wortlänge bei SD-Übertragungen auf 8 oder 10 Bit festgelegt worden ist. Die zunächst maximal mögliche Datenrate betrug 270 Mbit/s bei einer erforderlichen Bandbreite von 135MHz und einer SNRZI-Codierung¹⁴³. Damit wird erreicht, dass das Signal selbsttaktend und frei von Gleichspannung ist. Die Quellspannung beträgt 0,8Vss. Die Dämpfung auf einer solchen Leitung beträgt bei 135MHz Bandbreite weniger als 20dB auf 100m.¹⁴⁴ Da bei der SD-Übertragung 40dB Dämpfung ausgeglichen werden können, sind damit Leitungslängen um die 250m möglich. Bei SDI werden nicht nur Videodaten übertragen, sondern auch zusätzliche Daten im Multiplex. Dabei handelt es sich um Audiodaten (Embedded) und zusätzliche Daten (AUX). Bei SD-SDI teilen sich die 270Mbit/s wie folgt auf¹⁴⁵:

- Video:	207Mbit/s
- Audio:	ca. 6 Mbit/s
- weitere AUX-Daten:	ca. 34 Mbit/s
- Vertikale Austastung	ca. 16Mbit/s

Beim nachfolgenden HD-SDI-Standard wurde die maximale Datenrate auf 1,5Gbit/s erhöht. Über eine parallele Übertragung auf zwei physischen Leitern (DUAL-HD-SDI) wurde es möglich 10Bit RGB-Signale in HD zu übertragen.¹⁴⁶ Entsprechende Normungen der Kabel sind in SMPTE 292M festgelegt. Je nach Schirmung des Kabels sind bei HD Längen bis zu 160 Metern möglich, bei SD mit einer Datenrate von bis zu 270Mbit/s sind es im Vergleich dazu

¹⁴² vgl. Schmidt 2005, S. 121/2

¹⁴³ Scrambled Non Return to Zero (aus Englischem: Zerwürfelte NRZ-Codierung)

¹⁴⁴ vgl. Schmidt 2005, S. 122

¹⁴⁵ vgl. Schmidt 2005, S. 123, Abb. 3.33

¹⁴⁶ vgl. Schmidt 2005, S. 673/1

bei guter Schirmung mittlerweile sogar bis 590 Meter. Diese SMPTE-Norm bezieht sich allerdings nur auf derzeit im Fernsehen übertragene HD-Formate, auch CIF-Formate (siehe Kapitel 4.4). Die Übertragung von 1080p50-Signalen ist in der Normung SMPTE 424M festgehalten und bezieht sich auf Datenraten bis zu 3Gbit/s. Maximal erreichbare Kabellängen liegen hier bei 116 Metern. Wobei man anmerken muss, dass in der Praxis auch für diese Datenraten auch Dual-Link-Lösungen (hier SMPTE 372) definiert worden sind, bei denen der serielle Datenstrom auf zwei BNC- Kabel verteilt wird. In der folgenden Übersicht sind relevante SDI-Standards in einer Übersicht dargestellt.

Norm	Bezeichnung	Max. Bitrate	Videoformat	Max. Kabellänge (koaxial)
SMPTE 259M	SD-SDI	270Mbit/s	SD	590m
SMPTE 292M	HD-SDI	1,5Gbit/s	HD (1080i50)	160m
SMPTE 372M	Dual-Link-HD-SDI	2 x 1,5Gbit/s	HD (1080p50)	160m
SMPTE 424M	3G-HD-SDI	3 Gbit/s	HD (1080p50)	116m
SMPTE 2081	6G-UHD-SDI	6 Gbit/s	UHD-1	ca. 100m
SMPTE 2082	12G-UHD-SDI	12Gbit/s	UHD-1	ca. 60m
SMPTE 2088 ¹⁵⁵	24G-UHD-SDI	24Gbit/s	UHD-2	ca. 40m

Tabelle 17: Übersicht über aktuelle und zukünftige SDI-Normen

Die in der Übersicht angegebenen Kabellängen beziehen sich auf den aktuell bei BNC-Kabeln verwendeten Standard SMPTE 424. Die erreichbaren Kabellängen sinken mit dem erforderlichen Datendurchsatz ab. Für Studioverkabelungen sind die nach SMPTE 2088 für UHD-2 spezifizierten 40m unter Umständen ausreichend. Für Außenübertragungen, bei denen Kamerapositionen zum Teil über mehrere Kilometer abgesetzt werden, sind Koaxialkabel nicht praktikabel. Hier hat sich bereits bei HD die Glasfasertechnologie durchgesetzt, auf die in Kapitel 7.2 noch näher eingegangen wird. Dennoch werden Mehrkabelösungen von der SMTPE spezifiziert, um eine vorhandene SDI-Infrastruktur mit UHD weiter zu nutzen. Dabei wird das zu übertragende Signal auf mehrere physische Kanäle verteilt. Um dennoch auf jeder Leitung ein Gesamtbild (in verminderter Auflösung) zu übertragen, wird das Videobild nicht in Quadranten zerlegt, sondern es findet ein 2-Sample Division Mapping statt, wie in der Abbildung dargestellt. Dabei wird ein UHD-1-Bild auf vier HD-Bilder verteilt, die jeweils den gesamten Bildinhalt in HD-Auflösung enthalten. Werden die vier HD-Bestandteile am anderen Ende der Leitungen wird zusammengeführt, erhält man das vollständige UHD-1 Bild. Auf diese Art können vier konventionelle 3G-SDI-Leitungen mit der maximalen Kabellänge von 116m verwendet werden.



Abb. 30: Two-Sample Division Mapping eines UHD-1-Videos¹⁴⁷

Das Verfahren lässt sich ebenso auf UHD-2-Videos anwenden. Dabei wird das Ausgangsbild zunächst auf vier UHD-1-Bilder verteilt und diese anschließend auf jeweils vier HD-Bilder. Das UHD-2-Gesamtssignal kann dann auf 16 3G-HD-SDI-Leitungen übertragen werden, die jeweils ein vollständiges Full-HD-Bild führen. Dadurch kann eine Signalkontrolle auf allen 16 Leitungen mit einem HD-Monitor durchgeführt werden, wobei jeweils der Gesamtbildinhalt des aufgezeichneten UHD-2-Videos in HD-Auflösung anliegt.

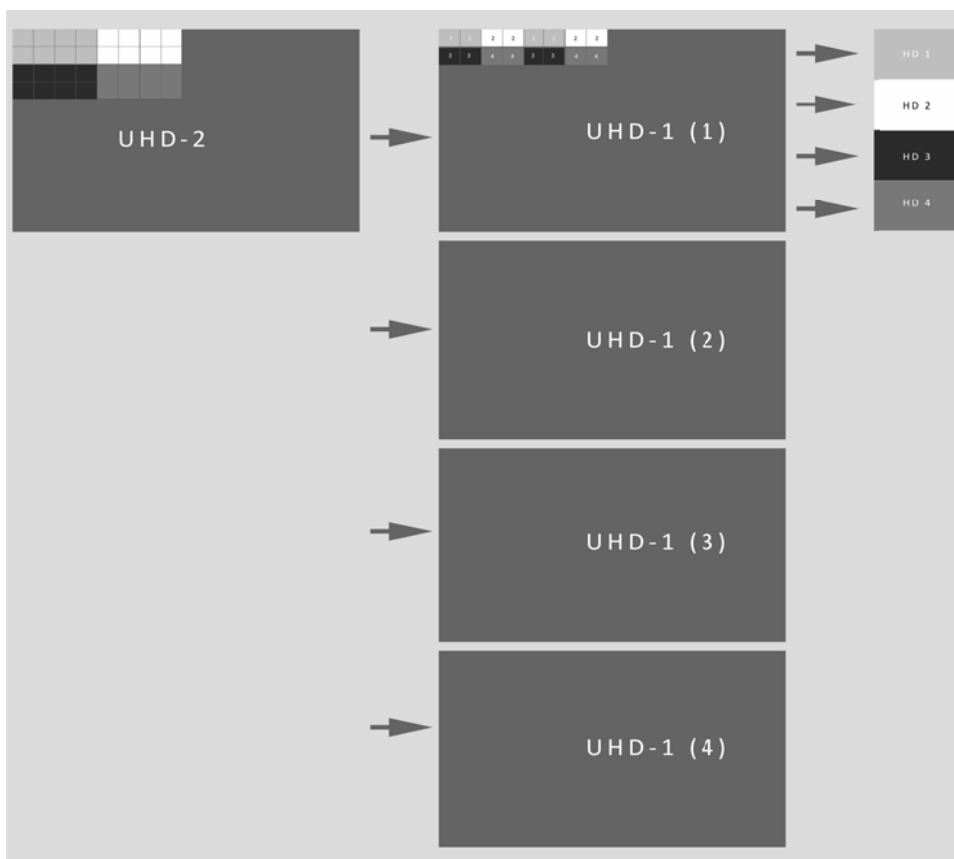


Abb. 31: Two-Sample Division Mapping eines UHD-2-Videos¹⁴⁸

¹⁴⁷ vgl. Semtech, S. 40

Es ist sicherlich fraglich, ob diese Lösung zukünftig praktikabel sein wird. Zwar können bestehende HD-Video-Infrastrukturen damit weiter genutzt werden, allerdings blockiert ein einzelnes UHD-2-Videosignal 16 3G-HD-SDI-Leitungen. Das dürfte viele Produktionshäuser ebenfalls an Kapazitätsgrenzen treiben und zur Verlegung zusätzlicher Kabel zwingen. Deshalb sind Multi-Link-Verkabelungen allenfalls eine Übergangslösung, bzw. dann denkbar, wenn nur wenige Videosignale parallel ausgetauscht werden. An dieser Stelle ist eine Übertragung über Glasfaser vielversprechender, wie die folgende Abbildung darstellt.

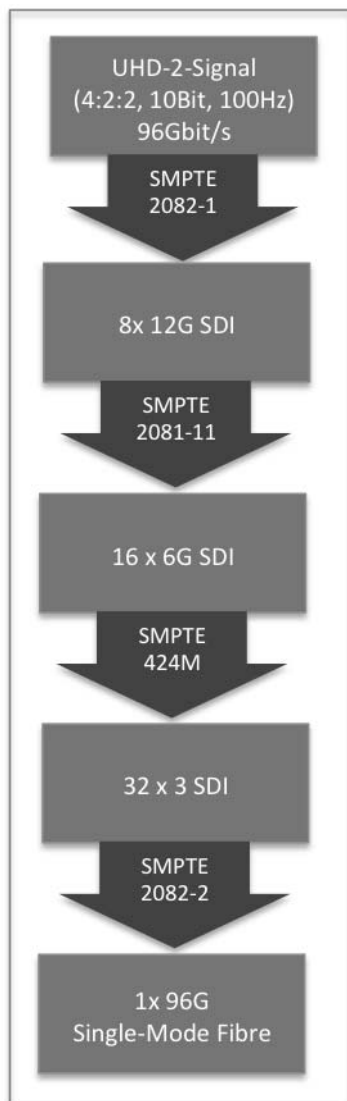


Abb. 32: Vergleich der Leitungszahl unterschiedlicherer Übertragungsnormen

Hier ist zu erkennen, wie UHD-2-Videosignale über verschiedene SMPTE-Standards sowohl über Koaxialkabel, als auch über Single-Mode-Glasfaser übertragen werden können. Die

Vorzüge der Glasfaser sind sehr deutlich, da hier nur eine Leitung erforderlich ist, anstatt beispielsweise 32 3G-SDI-Wege.

7.2 Glasfaserschnittstellen

Auch wenn Glasfaserkabel deutlich mehr kosten als Koaxialkabel, haben sie sich in vielen Bereichen der Datenübertragung (und somit auch im Videobereich) bereits durchgesetzt. In diesem Kapitel soll es grundsätzlich um die verschiedenen Glasfasertechniken als physikalische Schnittstelle für Video gehen. Natürlich ist das im vorigen Kapitel besprochene SDI auch für Glasfaser spezifiziert. Eine weitere interessante Entwicklung, die einige Synergien mit sich bringt, ist der Trend zu Video-over-IP, der nicht an das physikalische Medium verknüpft ist, jedoch eng damit verwoben (siehe Kapitel 7.3).

Grundsätzlich wird bei einer Glasfaserübertragung ein elektrisches Signal in ein optisches gewandelt und über ein Medium (z.B. Quarzglas) ausgesendet. An den Grenzflächen dieses Mediums kommt es zu Brechung und Reflexion in Abhängigkeit der Brechungsindizes der aneinander grenzenden Medien gemäß den Gesetzen der Optik.¹⁴⁹ Wenn Lichtstrahlen innerhalb einer Glasfaser verschiedene Wege nehmen können, also in verschiedenen Winkeln auf die Grenzflächen treffen, spricht man von verschiedenen Modi des Lichtes. Derartige Kabel bezeichnet man als Multimode-Kabel. Ihr Kern hat einen Durchmesser von $50\mu\text{m}$ (Dicke eines menschlichen Haares). Wenn man den Durchmesser der Faser soweit verringert, dass sich das Licht an der Grenzfläche entlang geradlinig ausbreitet, spricht man von einem Singlemode-Kabel.¹⁵⁰ Derartige Kabel sind aufwendiger herzustellen und entsprechend teurer, eignen sich aber besser für lange Übertragungsstrecken. Ihr Kern hat einen Durchmesser von $8\text{-}10\mu\text{m}$. Über 100km können mit derartigen Fasern ohne Verstärkung 50Gbit/s übertragen werden.¹⁵¹ Neben den Eigenschaften des Glases hat die Wellenlänge des verwendeten Lichtes Einfluss auf die Dämpfung. Für Signalübertragungen im Videobereich kommen zumeist Wellenlängen von 1300nm und 1500nm zum Einsatz¹⁵².

¹⁴⁹ vgl. Tanenbaum 2003, S. 114

¹⁵⁰ vgl. ebenda

¹⁵¹ vgl. Tanenbaum 2003, S. 115

¹⁵² vgl. Lynx AG

Das sind die Infrarotwellenlängenbereiche mit den besten Dämpfungseigenschaften (siehe Abbildung).

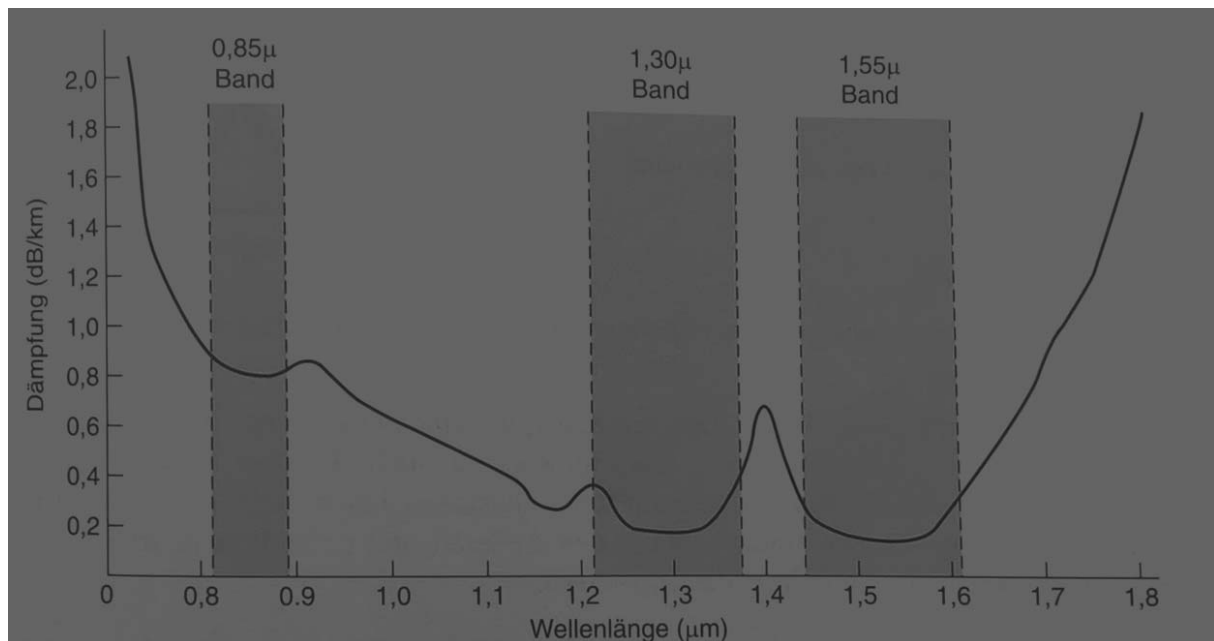


Abb. 33: Dämpfungseigenschaften von Glasfaser im Infrarotbereich¹⁵³

Im Videoproduktionseinsatz mit seinen modularen Anforderungen enden Glasfaserleitungen meistens in Steckern, die in Buchsen geführt werden und damit variable Verbindungen ermöglichen. Solche Steckverbindungen sind kritisch, weil hier 10-20% des Lichtes verloren geht. Weitere Verbindungsarten sind das mechanische Verspleißen von Fasern (10% Lichtverlust) und das Verschmelzen, das die geringste Dämpfung aufweist.¹⁵⁴

Dennoch sind mit Glasfaser im Vergleich zu elektrischer Übertragung über Kupfer längere Strecken ohne Signalverstärkung möglich.¹⁵⁵ Außerdem ist sie unempfindlich gegenüber Leitungsübersprechen durch elektromagnetische Wellen. Damit können einzelne Fasern sehr dicht aneinander verlegt werden. Ein nicht zu vernachlässigender Grund ist das geringere Gewicht. Im Kameraeinsatz sind Fiber-Kabel dünner und leichter als Kupfer-Triax-Kabel. Der Aufwand bei der Verlegung sinkt dadurch. Diesen Vorteil führen auch Telekommunikationsfirmen an. So haben 1000 Twisted Pair-Kabel von einem Kilometer Länge ein Gewicht von acht Tonnen. Zwei Glasfaserkabel gleicher Länge und sogar höherer

¹⁵³ Quelle: Tanenbaum 2003, S. 115

¹⁵⁴ vgl. ebenda

¹⁵⁵ ca. Faktor von 10:1

Übertragungskapazität wiegen nur 100 Kilogramm.¹⁵⁶ Im Broadcastbereich gibt es bereits Applikationen, die eine 4K-Übertragung von der Kamera zur Regie ermöglichen. Beispielhaft sei an dieser Stelle der Elektronikhersteller Sony mit seinem Glasfaseradapter SKC-4065¹⁵⁷ genannt, der es ermöglicht, aus der F65-Kamera 4K-Live-Signale mit bis zu 120 Bildern/Sekunde über SMPTE-Glasfaserkabel einen Kilometer zu übertragen. Genutzt wird dabei der Wellenlängenbereich von 850nm.¹⁵⁸

Nachteilig an Glasfaser ist neben des hohen Preises einzig ihre mechanische Empfindlichkeit. Ein bestimmter Biegeradius darf nicht unterschritten werden, da die Fasern sonst brechen können. Der Glasfaser gehört sicherlich die Zukunft in der Telekommunikation. In Deutschland ist sie allerdings für den Endverbraucher bislang nur an sehr wenigen Orten verfügbar, wie in Kapitel 9.2 dargestellt ist.

7.3. Video over IP

Im vorigen Kapitel wurde bereits die Entwicklung zum Video-over-IP angesprochen. Dabei muss man konkret etwas unterscheiden zwischen der Distribution (Streaming) und der Produktion (z.B. Sendeanstalt). Streaming von Videoinhalten ist keineswegs ein neues Thema, allerdings erreicht der Trend zu IP-basierten Videoübertragungen langsam auch die Signalquellen, wo bislang noch SDI-Strukturen dominieren. Eine erneute Totalumstellung dieser Videoinfrastrukturen im Zuge von UHD wäre für die Sender und Produktionsfirmen wohl kaum tragbar, Multi-Link-Verkabelungen (siehe Kapitel 7.1) allenfalls eine Übergangslösung. An dieser Stelle kommt der Entwicklung zu Gute, dass immer mehr Prozesse in der TV-Produktion mittlerweile file-basiert ablaufen. Das schließt längst nicht mehr nur Speicher- und Archivierungslösungen ein. Schon seit langem zeichnen Videokameras nicht mehr auf Band auf, sondern Dateien auf Speicherkarten.

Die aktuelle Entwicklung besteht im Bestreben, auch Live-Signale innerhalb der Produktionsumgebung über IP-Infrastrukturen zu verteilen. Bisher wird das im

¹⁵⁶ vgl. Tanenbaum 2003, S. 120

¹⁵⁷ vgl. Sony Pro: <http://www.sony.de/pro/product/broadcast-products-camcorders-camera-adaptors/skc-4065/overview/>, Abruf im März 2016

¹⁵⁸ SKC 4065, S. 17

professionellen Bereich über Punkt-zu-Punkt-Verbindungen realisiert, was bei größeren Produktionen zu einem enormen Verkabelungsaufwand führt. Hier bringt die IP-Technologie große Vorteile mit sich, weil bestehende Ethernet-Netzwerke zur Duplex-Übertragung genutzt werden können. Großer Vorteil ist die Formatunabhängigkeit. Unterschiedliche Videoformate äußern sich letztlich nur noch in unterschiedlichen Datenraten. Die verwendeten Containerformate spielen keine Rolle.¹⁵⁹ Damit sind von IP in gewisser Weise auch zukünftige Formate abgedeckt. In Bezug auf UHD wird die Entwicklung durch die mittlerweile breite Verfügbarkeit von 10GbE vorangetrieben. Damit können selbst über entsprechend geschirmte Twisted-Pair-LAN-Kabel (z.B. Cat6) 10Gbit/s übertragen werden. Entsprechende Switches und Netzwerkkarten sind mittlerweile keine teure Spezialtechnik mehr. Der große Vorteil von Video-over-IP besteht in der Einsparung spezieller SDI-Technik. So kann beispielsweise eine spezielle Videokreuzschiene, die bislang noch das Herzstück großer TV-Produktionen ist, durch einen IP-Router ersetzt werden. Zahlreiche Experten der TV-Branche sind sich sicher, dass dadurch die Kosten erheblich gesenkt werden können.¹⁶⁰ Ein weiterer Vorteil ist die relativ einfache Skalierbarkeit von IP-Strukturen im Vergleich zu SDI. Wenn eine Verbreitung per IP-TV (siehe Kapitel 9.2) erfolgt, ist es zudem möglich, über die gesamte Produktionskette im IP-Bereich zu bleiben, ohne zwischenzeitliche Konvertierung. Über eine 100GbE-Leitung könnte sogar das derzeit größte definierte UHD-2-Signal (4320p120, 4:2:2, 12Bit) übertragen werden. Bei UHD-1 (2160p50, 4:2:2, 10Bit) könnten 10 Videosignale parallel über eine solche Leitung übertragen werden. Für Video-over-IP wurde bereits ein Standard entwickelt, der sich SMPTE 2022 nennt¹⁶¹. Dieser soll garantieren, dass die IP-Video-Hardware unterschiedlicher Hersteller untereinander kompatibel ist und der Markt nicht von proprietären Lösungen durchdrungen wird. Innerhalb einer Produktionsstätte (z.B. Ü-Wagen oder TV-Anstalt) wird Audio-Video-Bridging (AVB) als Alternative dazu diskutiert. AVB ist für die Übertragung unkomprimierter Videosignale im IP-Layer 2 definiert. Die Codierungslatenz ist geringer als bei SMPTE 2022. AVB setzt spezielle Netzgeräte voraus, die den Standard unterstützen. Für eine Distribution, die ohnehin komprimiert erfolgt, liegt die Zukunft daher sicherlich bei der SMPTE-Lösung.

¹⁵⁹ vgl. Broadcast 2015, S. 13/2

¹⁶⁰ vgl. Broadcast 2015, S. 12: Interview mit Ramon Pankert von der Firma Riedel

¹⁶¹ IRT 2014, S. 17

Die Zusammenführung verschiedener Netze zu einem konvergenten Netz, in dem neben Email- und Medienaustausch, auch Voice-over-IP und Video-over-IP stattfindet, verlangt nach einem guten Quality of Service-Management, da Live-Signale eine sehr hohe Priorität haben. Würde die Videoübertragung unter der Auslastung des Netzwerkes durch parallellaufende Prozesse gestört, so würde sich der Vorteil der Synergie in einen großen Nachteil wandeln. Die Diskussion über Lösungsmöglichkeiten ist in der Industrie in vollem Gange und IP-Strukturen werden mit hoher Sicherheit kommen. Unklar bleibt bislang nur, ob UHD den Weg für Video-over-IP ebnet oder andersherum.

7.4 HDMI

Nachdem die verschiedenen Schnittstellen für Videosignale innerhalb einer Produktionskette betrachtet wurden, geht es im Folgenden um die finalen Verkabelungsmöglichkeiten zur Darstellung auf dem Monitor oder am TV. Moderne Consumergeräte nehmen Bildsignale weder über SDI, noch über Glasfaser entgegen. Hier existieren im Wesentlichen zwei Standards, wobei moderne Smart-TVs zusätzlich auch über einen LAN-Anschluss und einen WLAN-Controller verfügen, durch die es ermöglicht wird, IP-Videostreams über installierte Apps direkt auf dem Bildschirm darzustellen.

Der bisher verbreitetste Standard ist das seit 2003 verfügbare High Definition Multimedia Interface (HDMI). Die verschiedenen Standards sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Bezeichnung	Max. Datenrate	Max. unterstütztes Videoformat	Unterstützter Farbraum
HDMI 1.2a	3,96 GBit/s	HD (1080p60 4:4:4)	YCBCR, RGB, (8 Bit pro Kanal)
HDMI 1.3	10,2 Gbit/s	HD (bis 1440p60), auch 3D (24Hz)	YCBCR, RGB, (16 Bit pro Kanal)
HDMI 1.4a	10,2 Gbit/s[1]	UHD-1 (2160p24), HD (1080p120)	RGB (16Bit pro Kanal)
HDMI 2.0b	18 Gbit/s	UHD-1 (2160p60, 3D), HD (1080p120)	RGB (16 Bit pro Kanal) , BT.2020

Tabelle 18: Überblick über ausgewählte HDMI-Normen

Wie aus der Tabelle ersichtlich wird, sind die beiden letzten Standards HDMI 1.4a und HDMI 2.0b bereits für UHD-1 ausgelegt. Ab HDMI 2.0b wird zudem eine Bildrate von 60Hz, sowie der Farbraum BT.2020 (siehe Kapitel 5.4) unterstützt. Um die hohen Datenraten von UHD-1 über ein HDMI-Kabel (Cat2) fehlerfrei zu übertragen, dürfen Kabellängen von 8 Metern nicht

überschritten werden.¹⁶² Das reicht für die meisten Heimanwendungen sicher vollkommen aus. HDMI 2.0 legt bis zu 32 Audiokanäle fest und unterstützt den Kopierschutz HDCP 2.2.¹⁶³ Mittlerweile existieren zahlreiche Consumer-4K-Monitore, die diese Schnittstelle bereits implementiert haben. Was bislang kaum verfügbar ist, sind entsprechende Signalquellen, die ein natives UHD-Bild liefern. Einige BluRay-Player verfügen über HDMI 2.0, allerdings skalieren sie „nur“ die auf Blu-Ray verfügbaren HD-Bilder hoch und senden ein „künstliches“ UHD-1-Video an den Monitor (TV). Erste Geräte, die 4K-BluRays abspielen können, erreichten Anfang dieses Jahres den deutschen Endkundenmarkt. Das erste Modell stammt vom koreanischen Hersteller Samsung¹⁶⁴. Das Unternehmen nahm bereits bei Einführung der BluRay eine Vorreiterrolle ein. Das Problem sind neben der bislang spärlich verfügbaren Hardware zudem fehlende Inhalte. Momentan gibt es noch sehr wenige Medieninhalte auf 4K-UHD-BluRay zu kaufen.¹⁶⁵ Auch dieser Fakt wird sich voraussichtlich in diesem Jahr ändern, da viele Filme in den großen Produktionshäusern bereits als 4K-Master vorliegen, da wie bereits angesprochen, große Projekte zumeist schon in höherer Auflösung als HD produziert wurden (siehe Kapitel 9.3).

7.5 Displayport

Neben HDMI hat sich insbesondere im Computerbereiche eine weitere Schnittstelle zur Übertragung von Bildsignalen an den Monitor etabliert. Der Standard unterscheidet sich bereits dadurch, dass er ursprünglich für die hohen Anforderungen im PC-Bereich entwickelt wurde. So ist Displayport auch Bestandteil der Thunderbolt-Schnittstelle. Ebenso wie bei Thunderbolt kann mit Displayport Daisy Chaining betrieben werden. Damit können mehrere Monitore über die Schnittstelle in Reihe geschaltet werden, was den Verkabelungsaufwand verringert.

¹⁶² vgl. HDMI.org: <http://www.hdmi.org/learningcenter/kb.aspx?c=7#70>, Abruf am 9. April 2016

¹⁶³ vgl. Film-TV-Video-3-2014, S. 21

¹⁶⁴ vgl. <http://www.cnet.de/88163762/samsung-ubd-k8500-der-erste-4k-blu-ray-player-der-welt-im-hands-on/>, Abruf am 16. Februar 2016

¹⁶⁵ Stand: 9. April 2016



Abb. 34: Daisy Chaining mehrerer Monitore über Displayport¹⁶⁶

Die vorherige Version 1.3 des Standards ist seit September 2014 verfügbar. Die erreichbare Nettodatenrate beträgt dort 25,92Gbit/s¹⁶⁷. Damit sind UHD-1-Darstellungen mit 120Hz bei 8 Bit pro Farbkanal möglich oder 96Hz bei 10 Bit.¹⁶⁸ Im Gegensatz zu HDMI unterstützt Displayport bereits Auflösungen von UHD-2. Bei 8-Bit-Quantisierung und 60Hz lässt sich damit ein 4:2:0-Signal darstellen.

Am 1. März 2016 wurde die neue Spezifikation Displayport 1.4 von der VESA¹⁶⁹ vorgestellt. Hier liegt die erreichbare Nettodatenrate bei 32,4Gbit/s. Außerdem ist bei Displayport 1.4 das Kompressionsverfahren DSC¹⁷⁰ angewandt worden. Dabei handelt es sich um eine visuell verlustfreie Komprimierung. Mit DSC (Version 1.2) werden bei der Bildübertragung Kompressionsraten bis 3:1 möglich, ohne dass das dargestellte Bild sich visuell vom Original unterscheidet. Mit der aktuellen Version ist über Displayport auch ein UHD-2-Signal mit 60Hz darstellbar. UHD-1-Signale mit bis zu 120Hz können ebenso übertragen werden.

8 UHD-Displays

Wie schnell sich UHD-TV am Markt etablieren wird, hängt maßgeblich davon ab, inwiefern der Konsument / Zuschauer einen tatsächlichen Mehrwert für sich sieht. Die Statistik zeigt, dass die Nutzung von UHD-Funktionalitäten gerade bei 4% liegt. Interessant ist nebenbei auch der Fakt, dass die DVD (SD-Video) mit 60% Nutzung immernoch weit vor der Bluray (HD-Video) mit 26% liegt. Hieraus lässt sich eine gewisse Trägheit in der Adaption neuer Technologien erkennen, die mit Neuanschaffungen verbunden sind. Allerdings ist ebenso erkennbar, dass 90% der Early Adopters, die bereits ein UHD-TV-Gerät besitzen, dieses auch nutzen. Bei Stereo-3D liegt diese Nutzungsrate gerade einmal bei 55%.

¹⁶⁶ vgl. Displayport.org: <http://www.displayport.org/get-connected/>, Abruf am 9. April 2016

¹⁶⁷ vgl. Displayport.org: [http://www.displayport.org/faq/#DisplayPort 1.3 FAQs](http://www.displayport.org/faq/#DisplayPort%201.3%20FAQs), Abruf am 16. Februar 2016

¹⁶⁸ vgl. ebenda

¹⁶⁹ Organisation mit über 200 Mitgliedsfirmen, deren Ziel es ist, einheitliche Standards im Bereich Video und Computergrafik zu schaffen

¹⁷⁰ Display Stream Compression

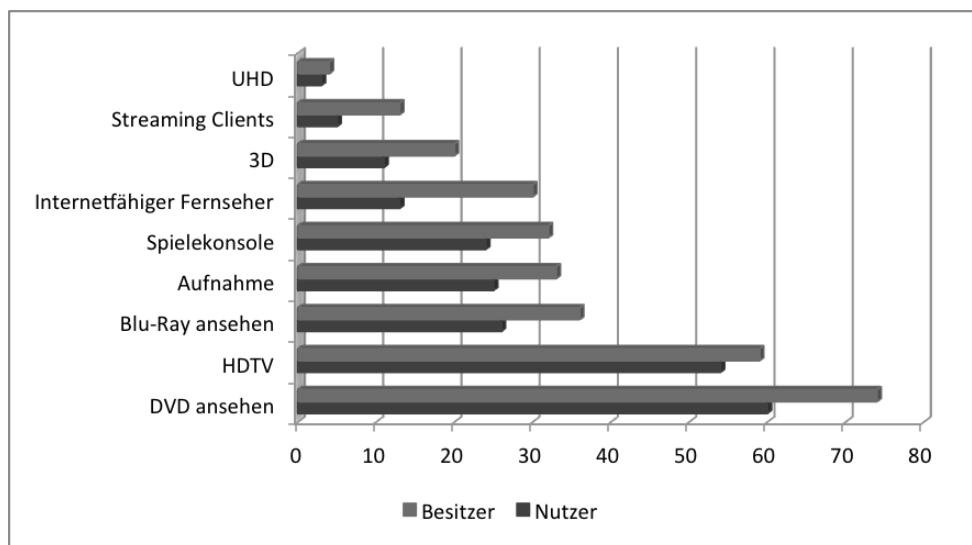


Abb. 35: Nutzung von TV-Funktion in Deutschland

Die Abbildung unten zeigt, dass der weltweite Verkauf von UHD-TV-Geräten sich bis zum Jahr 2018 auf 79 Mio Stück steigern wird. Das dürfte nicht zuletzt daran liegen, dass die Hersteller zukünftig tendenziell mehr UHD-TV-Geräte im Sortiment führen werden. Die im Zuge der UHD-Normierung vorgeschlagenen Verbesserungen der Bildparameter wurden auf dem Displaymarkt für Consumer-Geräte bislang nur teilweise umgesetzt. In einer ersten Phase kamen Monitore und TV-Geräte auf den Markt, die zwar die neue Auflösung (zunächst UHD-1) unterstützten, darüberhinaus aber keine Bildverbesserungen mit sich brachten.

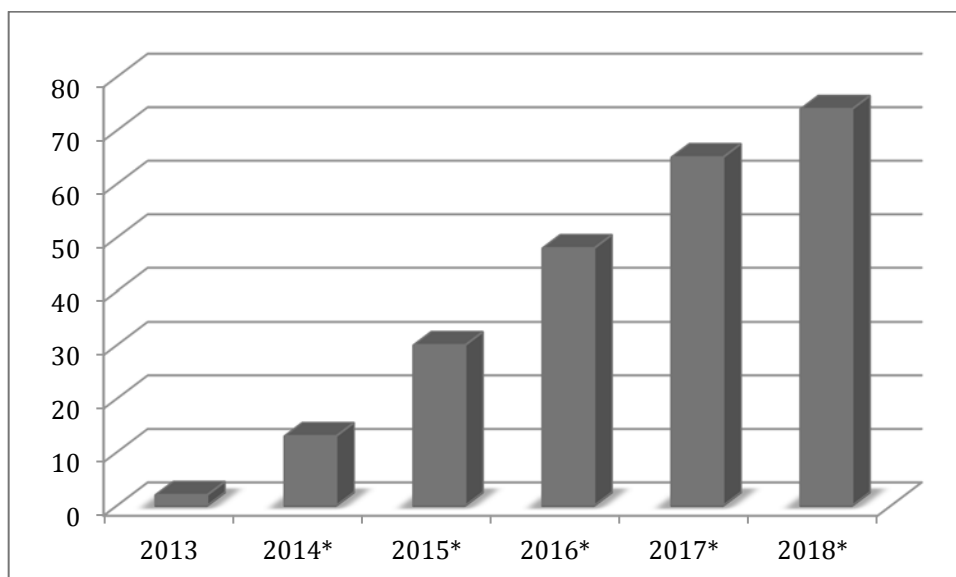


Abb. 36: Prognose Absatz von UHD-TV-Geräten bis 2018¹⁷¹

¹⁷¹ vgl. Statista

Dabei könnte insbesondere die Anhebung des darstellbaren Kontrastes im Bild (HDR) eine deutlichere visuelle Verbesserung mit sich bringen als die bloße Erhöhung der Pixelzahl, bei der man im Heimbereich ab einem bestimmten Betrachtungsabstand ohnehin recht schnell an Grenzen der Wahrnehmung oder der Deckenhöhe des Wohnzimmers stößt, wie in Kapitel 5.1 gezeigt wurde. Wenn man sich als Betrachter allerdings nahe am Bildschirm befindet, wie es bei der Arbeit am Computer der Fall ist, haben UHD-Auflösungen durchaus auch an kleineren Bilddiagonalen ihre Daseinsberechtigung. Bislang bestand bei Windowsbetriebssystemen die Problematik, dass bei hochaufgelösten Anzeigegeräten keine individuelle Skalierung von Programmen möglich war. Das führte an 4K-Monitoren häufig zur schlechten Lesbarkeit durch zu kleine Darstellung. Dieses Problem soll mit der Einführung von Windows 10 der Vergangenheit angehören.¹⁷² Apple verspricht mit seinen Retina-Displays die Auflösung des menschlichen Auges zu erreichen.¹⁷³ Die Pixelbreite beträgt beim 27"-iMac 0,01167 Zentimeter. Bei einem Betrachtungsabstand von 50 Zentimetern ergibt sich somit ein Winkel α von $0,0134^\circ$. Da α_{min} $0,016^\circ$ (siehe Kapitel 3.3) beträgt, gilt:

$$\alpha < \alpha_{min}$$

Folglich können die einzelnen Bildpunkte nach Abbe nicht mehr vom menschlichen Auge erfasst werden. Bei einem halben Meter Abstand bietet das 5K-Display eine optimale Auflösung. Eine darüber hinaus gehende Erhöhung der Auflösung macht nur Sinn, wenn gleichzeitig die Bilddiagonale vergrößert wird. Um diese Entwicklung voranzutreiben, bieten einige Displayhersteller sogenannte *Curved Displays* an. Dabei ist die Oberfläche des Bildschirms nicht mehr plan, sondern gekrümmt. Dadurch kann man noch näher an den Monitor heran, was durch die künftigen UHD-2-Auflösungen begünstigt wird. Das Problem dieses Displaydesigns besteht darin, dass der Betrachter zentral vor dem Monitor sitzen muss. Bei einem Computerbildschirm stellt diese Anforderung kein größeres Problem dar. Bei einem TV-Geräte, vor dem mehrere Personen sitzen, entstehen für die Betrachter, die außerhalb der Mitte sitzen, Bildverzerrungen.

Ein Bildparameter, der unabhängig vom Betrachtungsabstand ist und zukünftig eine größere Rolle spielen könnte als die Auflösung, ist der Kontrast, den das menschliche Auge erfassen

¹⁷² vgl. Digitaltrends.com: <http://www.digitaltrends.com/computing/windows-10-review-high-resolution-support/>, Abruf am 10. April 2016

¹⁷³ vgl. <http://www.apple.com/de/imac/>, Abruf am 10. April 2016

kann. Dieser liegt bei ca. 100 000:1 (100dB). Die Firma Dolby hat in Befragungen von Testzuschauern ermittelt, dass ein Dynamikumfang von 22 Blenden (130dB)¹⁷⁴ 90% der Betrachter zufriedenstellt.¹⁷⁵ Derzeitig verbreitete TV-Geräte haben häufig noch ein Kontrastumfang von 0,1 bis 100cd/m² (60dB). Moderne Kameras zeichnen heute bereits bis zu 16 Blendenstufen (96dB) auf und liegen damit weit über dem, was letztlich auf dem Display dargestellt wird.¹⁷⁶

Das große Problem bei der Umsetzung der bereits vorgestellten Norm BT.2020 (auch die Erhöhung des Kontrasts gehört dazu) besteht darin, eine abwärtskompatible Lösung zu schaffen, die auf entsprechend neuen Endgeräten das volle Potential von BT.2020 nutzt, aber gleichzeitig auch auf älteren Monitoren funktioniert. Dolby setzt dabei an, das über Metadaten zu realisieren, die durch die ganze Produktionskette mitgeführt werden und am Ende das darzustellende Bild an das verwendete Endgerät anpassen und so nahe am ursprünglichen Aussehen bleiben. Zur Distribution durchläuft das erstellte farbkorrigierte Master über einen Dolby-Vision-Encoder, der die Metadaten in das eigentliche Signal integriert. Dabei existiert ein Single-Layer-Verfahren, das ausschließlich mit Dolby-Vision-fähigen Endgeräten kompatibel ist. Für eine breite Einführung am Markt ist dieses Verfahren eher ungeeignet. Interessanter ist das Dual-Layer-Verfahren, bei dem die Zusatzinformation separat zum Standard-Videosignal übertragen, was zu einer 20% höheren Datenrate führt.¹⁷⁷ Die Alternative, zwei Streams (HDR und Standard) komplett separat zu übertragen, würde allerdings mehr Datenrate beanspruchen. Es ist zu erwarten, dass neben Dolby noch weitere Unternehmen mit Lösungen auf den Markt treten werden. Dann werden letztlich auch die Preise für Lizenzgebühren mitentscheidend sein, die die Hersteller für die Implementierung der Patente zahlen müssen. Noch ist nichts entschieden, Dolby zeigt aber einen Weg auf, der die Entwicklung von UHD-konformen Displays stärker vorantreiben und somit auch die Verbreitung fördern könnte.

¹⁷⁴ entspricht einem Kontrastverhältnis von 130dB

¹⁷⁵ vgl. Broadcast 2015, S. 26

¹⁷⁶ vgl. ebenda

¹⁷⁷ vgl. Broadcast 2015, S. 28

9 Distribution von UHD-Video

Eine Verbreitung von UHD-Inhalten ist in erster Linie sicherlich daran geknüpft, wie schnell diese einem breiten Publikum zugänglich gemacht werden können. Zur Verteilung der Medieninhalte kommen mehrere Wege in Betracht, die hinsichtlich ihrer physikalischen Bedingungen unterschieden werden müssen. Profan gesagt verlangen größere Datenmengen nach einer höheren Verarbeitungs- und Übertragungsgeschwindigkeit, sowie mehr Bandbreite auf dem Übertragungskanal. Besonders wichtig ist dabei die langfristige Etablierung von allgemeinen Industriestandards. Gerade hier wird eine schnelle Entwicklung durch die konventionellen Videoübertragungswege oftmals abgebremst.

9.1 TV-Auswertung

Auch wenn Online-Dienste insgesamt eine immer größere Bedeutung (so auch für das Video-Streaming) einnehmen, ist das Fernsehen in Deutschland noch immer das am häufigsten genutzte Medium. Betrachtet man allerdings die Altersgruppe von 14 bis 29, so wird der Trend weg vom klassischen TV hin zum Internet recht deutlich.

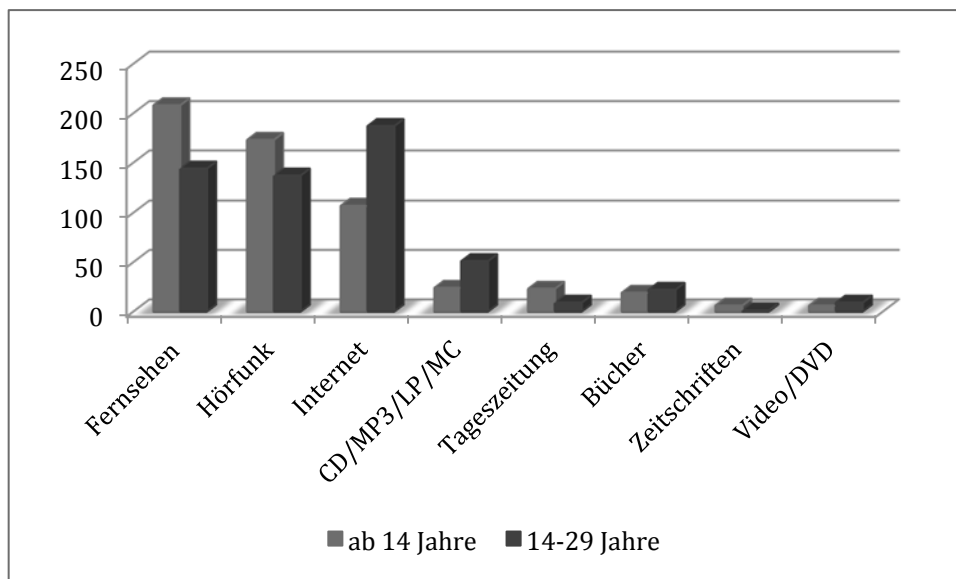


Abb. 37: Tägliche Mediennutzungsdauer in Minuten in Deutschland 2015¹⁷⁸

Damit UHD kein Alleinstellungsmerkmal für Video-on-Demand-Dienste bleibt, sollten sich die Fernsehbetreiber zumindest mit künftigen Möglichkeiten der Übertragung auseinandersetzen, denn bereits jetzt verfügen 70 000 Haushalte in Deutschland über UHD-TV-Geräte.¹⁷⁹ Momentan werden die meisten davon über Satellit und Kabel erreicht. DVB-T

¹⁷⁸ vgl. Statista: ARD-ZDF-Langzeitstudie Massenkommunikation

¹⁷⁹ vgl.

und IP-TV spielen hier noch keine große Rolle. Mit der Einführung von DVB-T2 könnte sich das ändern, da hierdurch die bislang beste Qualität einer HD-TV-Übertragung in Deutschland möglich wird (siehe Kapitel 9.1.3).

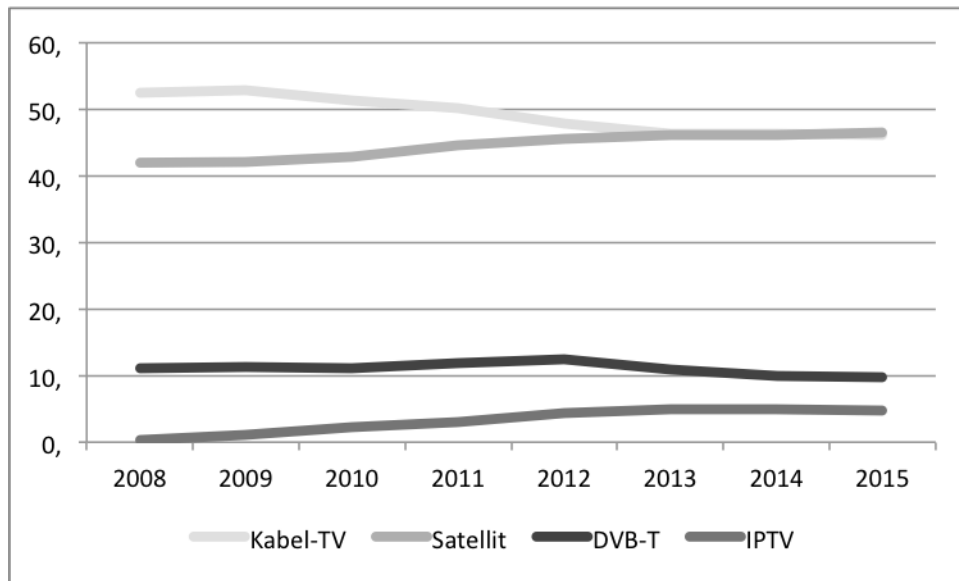


Abb. 38: Anteile verschiedener Übertragungswege an TV-Haushalten in Deutschland 2008-2015¹⁸⁰

9.1.1 DVB-S2

Der gegenwärtige Standard der Satellitenübertragung ist DVB-S2. Dabei werden die Videosignale zumeist in H.264 codiert übertragen. Es existieren auch Sender, die weiterhin einen MPEG-2-Stream senden, wie es beim vorigen DVB-S-Standard üblich war. Über einen Transponder werden in Deutschland zumeist 5 HD-Programme ausgestrahlt. Die jeweils zur Verfügung gestellte Bandbreite kann dabei vom Satellitenbetreiber definiert werden. Insgesamt steht auf einem DVB-S2-Transponder eine Kapazität von 60Mbit/s zur Verfügung¹⁸¹, die je nach Anzahl der darauf übertragenen Programme aufgeteilt werden. Ein HD-Feed mit H.264 codiert hat üblicherweise eine Datenrate von etwa 8Mbit/s. Über einen H.265-Codec könnten UHD-1-Feeds auf ca. 20Mbit/s komprimiert werden. Damit ließen sich drei UHD-1-Programme über einen Transponder übertragen.¹⁸² Im Live-Encoding wurden diese 20Mbit/s bei praktischen Tests bislang noch nicht erreicht. Die SES Platform Services (SPS)¹⁸³ testete dazu bereits 2014 für den Pay-TV-Sender Sky einen 4K-Live-Encoding-Workflow bei einem Bundesliga-Fußballspiel und einigen Konzerten. Dabei spielte neben

¹⁸⁰ vgl. Statista

¹⁸¹ vgl. ETSI 2015, S.85

¹⁸² vgl. ebenda

¹⁸³ Broadcastdienstleister

dem Encoding auch die Verschlüsselung eine wichtige Rolle.¹⁸⁴ Das Signal wurde in H.265 mit 25Mbit/s übertragen. Das größte Problem bestand dabei, das 10Gbit/s-Signal aus dem Ü-Wagen live in einen 25Mbit/s-Stream zu wandeln.¹⁸⁵ Sky Deutschland ist bislang der einzige TV-Sender, der in Deutschlands aktiv das Thema UHD-TV vorantreibt. Nach Einschätzung von Sophie Lersch, Chief Commercial Officer SPS, wird 4K im Satellitenbereich zunächst auch nur Pay-TV-Kunden erreichen.

9.1.2 DVB-C

Neben DVB-S2 ist DVB-C in Deutschland der bedeutendste Sendeweg in die Haushalte. Die Übertragung erfolgt hier üblicherweise mit 6 oder 8MHz Bandbreite. Je nach Modulationsart ergibt sich damit eine Bitrate von etwa 30-50Mbit/s pro Kanal. Bei einer UHD-Übertragung würden somit 1-2 Feeds momentan einen kompletten Kanal blockieren, was ökonomisch sicher nicht vertretbar ist. Derzeit bringt Kabel Deutschland auf einem Kanal mit 256QAM-Modulation und 8MHz Bandbreite (ca. 50Mbit/s Bitrate) etwa 6 HD-Kanäle mit je 8Mbit/s Bitrate unter.¹⁸⁶

Der Nachfolgestandard DVB-C2 wurde 2010 bereits von ETSI vorgestellt, ist aber in Deutschland bislang nicht implementiert worden. Er ermöglicht 4096-QAM-Modulationen und erlaubt damit über 80Mbit/s Bitrate pro Kanal¹⁸⁷, was zukünftig mit H.265-Codierung wiederum genug für vier UHD-1-Feeds sein könnte. Bislang ist keine konkrete Umsetzung geplant, was in Zukunft dazu führen könnte, dass der konventionelle Kabelanschluss an Bedeutung verliert, wenn der terrestrische Sendestandard gegenüber dem heutigen verbessert wird.

9.1.3 DVB-T2

Die terrestrische Übertragung besitzt in Deutschland bislang keine große Bedeutung. Das könnte sich allerdings bereits in diesem Jahr ändern, wie dieses Kapitel zeigen soll. Für die

¹⁸⁴ vgl. 4K-Special 2, S. 16

¹⁸⁵ vgl. ebenda

¹⁸⁶ vgl. Kabel Deutschland Helpdesk: <http://helpdesk.kdgforum.de/sendb/belegung-251.html>, Abruf im März 2016

¹⁸⁷ ETSI 2010, S. 32

digitale terrestrische Übertragung bei DVB-T nutzt man den VHF- und UHF-Frequenzbereich. Bei DVB-T1, das bis dato in Deutschland genutzt wird, kommt MPEG2 zum Einsatz. Bislang findet die Ausstrahlung aufgrund der hohen Bandbelegung ausschließlich in SD statt. In Deutschland beträgt die Datenübertragungsrate pro Kanal, über den bis zu vier Programme übertragen werden, 12- 20Mbit/s. Dieser Wert variiert jedoch in Abhängigkeit von der Verteilung von Sendeanlagen. Je weiter ein Signal terrestrisch übertragen werden soll, umso größer muss das mitübertragene Schutzintervall gewählt werden und umso kleiner fällt die für den Stream zur Verfügung stehende Netto-Bitrate aus. Für das einzelne Programm bleiben etwa 3Mbit/s.

Mit der Einführung von DVB-T2 wird die Übertragung von höher aufgelöstem Video (zunächst HD) möglich. Außerdem soll das Spektrum effektiver ausgenutzt werden (um 30%).¹⁸⁸ Als Modulation kommt eine 256QAM zum Einsatz, was zu einer Kapazitätssteigerung gegenüber DVB-T1 (max.64QAM) führt. Ein Programm wird nicht mehr nur über einen Kanal übertragen, sondern über mehrere Kanäle verteilt. Durch dieses Time-Frequency-Slicing (TFS) werden die Streams weniger stör anfällig, da ein Übertragungsfehler auf einem Kanal für das einzelne Programm weniger stark ins Gewicht fällt.

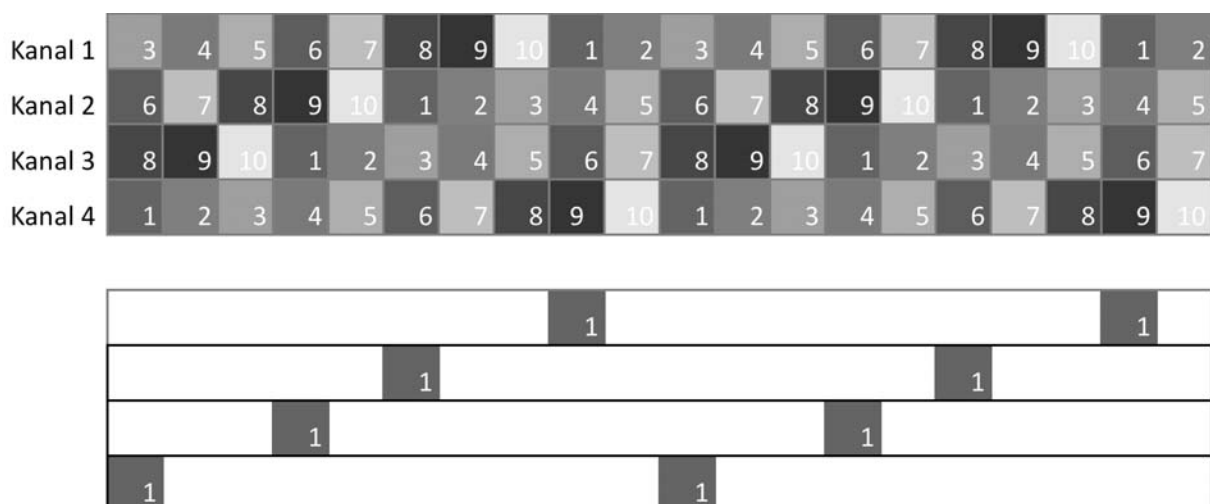


Abb. 39: Time-Frequency-Slicing bei DVB-T2

Eine weitere Effizienzsteigerung durch H.265 als Quellcodierung könnte eine wirtschaftliche Übertragung von UHD-Signalen ermöglichen. Die von der SES bereits erprobten 25Mbit/s für einen UHD-1-Stream benötigten zurzeit immer noch einen ganzen Kanal, aber die technische

¹⁸⁸ Götz 2013, S. 6

Realisation von UHD-1 über DVB-T wurde bereits 2013 von der EBU auf dem Mobile World Congress in Barcelona erfolgreich erprobt. Damals kam noch H.264-Encoding-Hardware zum Einsatz. Die benötigt Nettobitrate betrug 35Mbit/s.¹⁸⁹

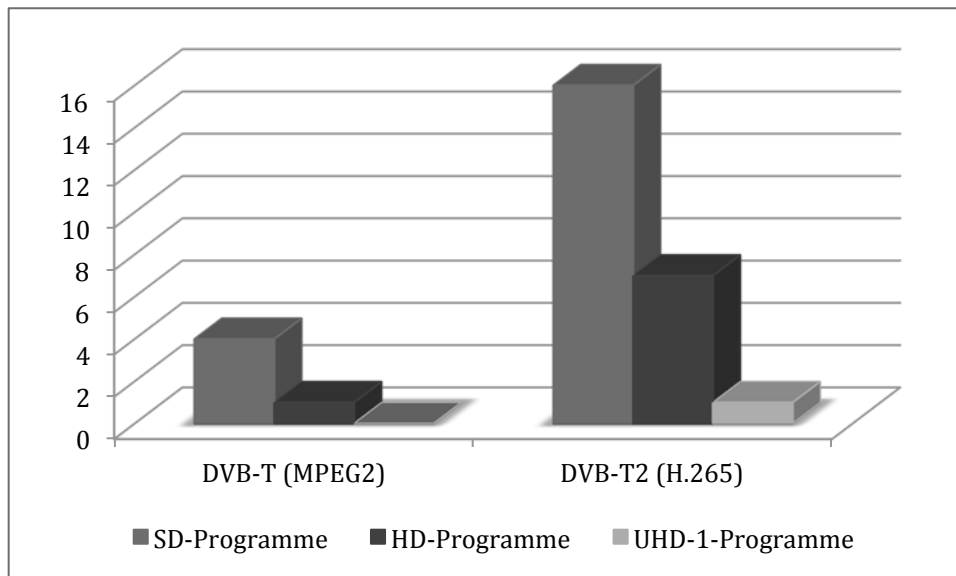


Abb. 40: Übertragbare Programme pro Multiplex-Kanal bei DVB-T und DVB-T2¹⁹⁰

Das Problem bei der bevorstehenden Einführung von DVB-T2 besteht darin, dass es nicht abwärtskompatibel zu älteren Empfangsgeräten ist. Eine Neuanschaffung auf Seiten der Zuschauer wird erforderlich. Für die Sender bedeutet das, bis 2018¹⁹¹ einen Simulcastbetrieb aufrechtzuerhalten, in dem mit beiden Standards gesendet wird. DVB-T2 ermöglicht zudem HD-Signale mit 50 progressiven Bildern pro Sekunde zu senden, was das ZDF bereits angekündigt hat, umzusetzen.¹⁹² In Deutschland wird das momentan weder über Satellit, noch über Kabel realisiert. Damit erlaubt DVB-T2 in sehr naher Zukunft die beste Videoqualität unter den konventionellen TV-Übertragungswegen. Über die bundesweit verfügbaren 6 UHF-Kanäle können 42 HDTV-Programme übertragen werden. Die Ausstrahlung von DVB-T2 beginnt Mitte dieses Jahres in ausgewählten Testgebieten.

¹⁸⁹ UHD und 4K – FKTG Kolloquium IRT München, 24. 6. 2013, S. 30ff

¹⁹⁰ vgl. HD-Signale über die Hausantenne

¹⁹¹ vgl. film-tv-video.de: <https://www.film-tv-video.de/technology/2015/06/25/hd-signale-uber-die-hausantenne-dvb-t2/>, Abruf am 12. November 2015

¹⁹² vgl. ebenda

9.2 Online-Auswertung und IP-TV

Grundvoraussetzung für den Empfang von UHD-Video über IP ist ein Breitbandanschluss. Wie in Kapitel 7.2 bereits angesprochen, bietet die Übertragung via Glasfaser sehr viele Vorteile und ist sehr gut zur Überwindung langer Distanzen geeignet. Elektrische Leitungen kommen zumindest für unkomprimierte Signale ohne Verstärkung nur für kurze Distanzen von einigen Metern in Frage (z.B. Monitorverkabelung). Die Glasfaser bis „zur Haustür“ und die damit möglichen schnellen Datenanbindungen von Privathaushalten ist eine Entwicklung, die die Verbreitung von UHD-Videoinhalten vorantreiben könnte, da sich Video on Demand schon heute großer Beliebtheit erfreut. In Sachen Fiber to the Home (FTTH), also der Glasfaserleitung bis zum privaten Endkunden, liegt Deutschland in der Statistik allerdings leider sehr weit zurück im internationalen Vergleich. Das Technikvorreiter Japan 71,5% aller stationären Breitbandanschlüsse über Glasfaser abdeckt, verwundert wenig. Schließlich ist die dort ansässige Rundfunkanstalt NHK auch einer der Vorreiter, was die UHD-Technologie angeht. Allerdings reihen sich auch zahlreiche europäische Nationen vor Deutschland ein, wo 2014 gerade einmal 1,1% aller Breitbandanschlüsse über Glasfaser realisiert wurden.

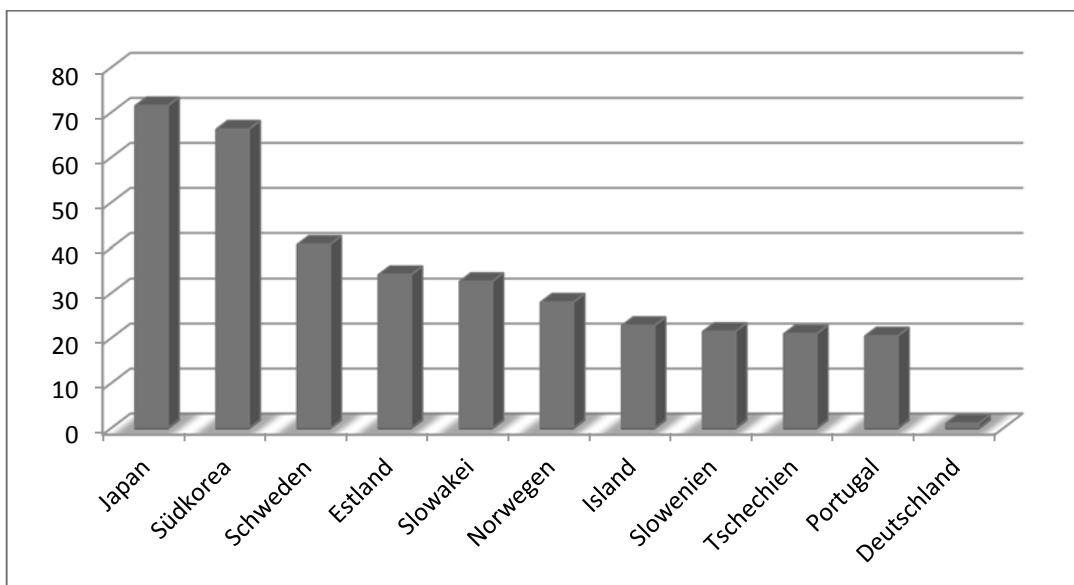


Abb. 41: Anteil von Glasfaseranschlüssen im internationalen Vergleich (Stand 2014)¹⁹³

Die Deutsche Telekom bewirbt zwar für Endkunden FTTH (Fiber To The Home) mit 200Mbit/s Download und 100Mbit/s Upload, weist aber gleichzeitig auf ihrer Website darauf hin, dass

¹⁹³ vgl. Statista: OECD

die Technologie nur in wenigen Anschlussgebieten verfügbar ist.¹⁹⁴ Da momentan noch der VDSL-Ausbau vorangetrieben wird, ist ein Ausbau von FTTH derzeit eher unwahrscheinlich.¹⁹⁵ In den folgenden Karten ist der aktuelle Stand des Breitbandausbaus einmal am Beispiel Dresdens gezeigt.¹⁹⁶



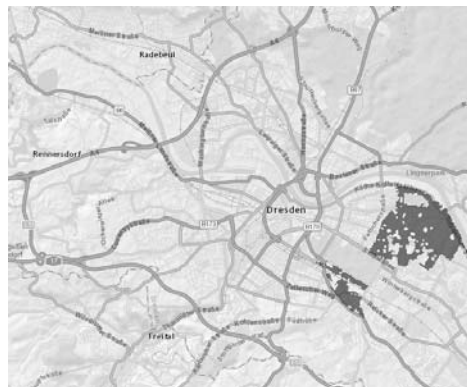
DSL 16000 und schneller



VDSL 50 und schneller



VDSL 100 und schneller



Fiber 200 (FTTH)

Abb. 42: Verbreitung von Breitbandanschlüssen in Dresden

Hier wird deutlich, dass FTTH selbst innerstädtisch noch keine große Rolle spielt. Selbst VDSL 100 ist momentan nur sehr lückenhaft verfügbar. Damit bleiben vielen Nutzern maximal 50 Mbit/s an Downloadgeschwindigkeit. Laut Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur sollen bis zum Jahr 2018 mindestens 50Mbit/s in Deutschland flächendeckend verfügbar sein.¹⁹⁷ Damit ließe sich zwar ein UHD-1-TV-Livestream abspielen, allerdings nehme dieser bereits etwa die Hälfte der verfügbaren Anschlussbandbreite in Anspruch, da

¹⁹⁴ vgl. <http://www.telekom.de/privatkunden/zuhaus/internet-und-fernsehen/geschwindigkeit/speed-xl-fiber-200>, Abruf am 1. April 2016

¹⁹⁵ Quelle: Telefonat mit Telekom-Mitarbeiter am 24. November 2014

¹⁹⁶ vgl. <http://www.telekom.de/breitbandausbau-deutschland>, Abruf am 1. April 2016

¹⁹⁷ vgl. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/digitale-infrastruktur.html>, Abruf am 1. April 2016

hier die Kompressionsraten geringer ausfallen. Ein bidirektionaler UHD-1-Stream (z.B. Videokonferenz wäre über eine solche Verbindung nicht möglich. Dafür sollten mindestens 100Mbit/s (verteilt auf Up- und Download) zur Verfügung stehen. Speziell das immer breitere Angebot von Video-on-Demand-Diensten besitzt etwas geringere Anforderungen an die Bandbreite.

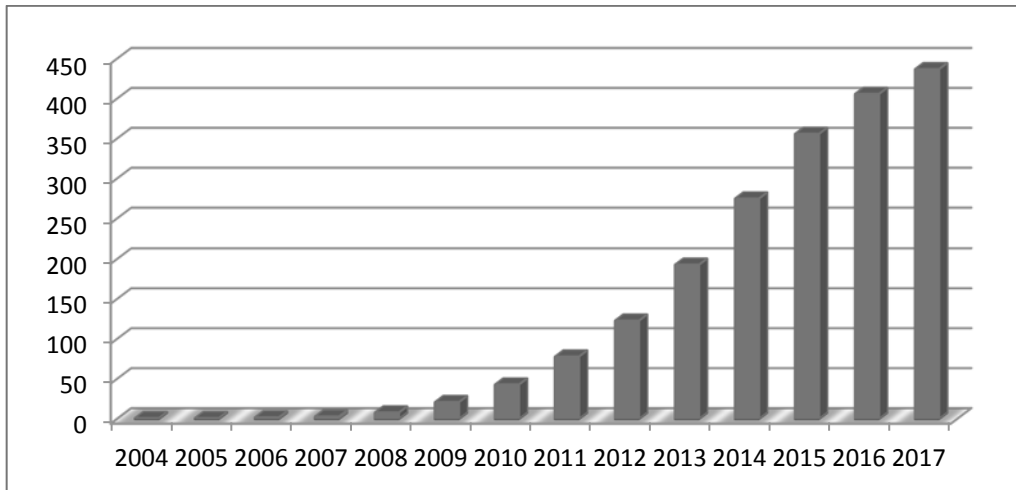


Abb. 43: Umsätze von Video-on-Demand-Diensten in Deutschland 2004-2012 und Prognose bis 2017¹⁹⁸

Da dabei kein Live-Encoding von Video erforderlich ist, können die Streams bei gleicher visueller Qualität stärker komprimiert werden als bei zeitkritischen Anwendungen (siehe Kapitel 5.7). Der Anbieter Netflix streamt seine 4K-Inhalte H.265-encodiert mit einer Datenrate von 15,6Mbit/s.¹⁹⁹ Damit reicht ein Breitbandanschluss mit 50Mbit/s Downstream aus, um neben einem entgegengenommenen UHD-1-Stream noch genügend Bandbreite für weitere Anwendungen im Haushalt zur Verfügung zu haben. Es ist daher zu erwarten, dass UHD-Inhalte sich zunächst auf On-Demand-Angebote beschränken werden, bevor Live-, bzw. bidirektionale Applikationen eine Rolle spielen könnten.

9.3 Speichermedien

Es ist davon auszugehen, dass zukünftig Videodaten Cloud-Servern gespeichert vorliegen und somit ortsunabhängig auf Endgeräte gestreamt werden. Experten prognostizieren gar, dass es in 10 Jahren keinen Markt mehr für physische Speichermedien geben wird. Allerdings wurde in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, dass die konventionellen Übertragungswege in Deutschland noch nicht für UHD vorbereitet sind und auch die Verfügbarkeit entsprechender Breitbandanschlüsse nicht flächendeckend gegeben ist. Aus

¹⁹⁸ vgl. Statista: House of Research

¹⁹⁹ vgl. 4K Special 2, S. 11

diesen Gründen ist die UHD-Bluray wohl das erste Medium, das 4K in guter Qualität in die Wohnzimmer bringt.²⁰⁰ Wohlmöglich handelt es sich dabei gleichzeitig auch um den letzten physischen Wechseldatenträger, der auf einen Massenmarkt zielt. Die Distribution über Datenträger bietet den Vorteil, dass man unabhängig von der digitalen Infrastruktur in die Lage versetzt wird, UHD-Videos zu nutzen. Dabei besteht keine Gefahr von Rucklern oder gar Streamausfällen durch eine Überlastung der zur Verfügung stehenden Bandbreite.²⁰¹ Damit ist der Wechseldatenträger eine gute Option, um ein autarkes Videosystem zu betreiben. Neben dem Heimkino ergeben sich weitere Anwendungsmöglichkeiten für Szenarien, in denen Inhalte nicht live von außen eingespeist werden müssen. Das können Großbildmonitore in öffentlichen Gebäuden oder Schaufenstern, bzw. Messen sein. Eine derartige Lösung ist schnell und ohne viel Aufwand einzurichten. Die 4K-UHD-Blurays nutzen neben den bisher verwendeten 50GB-Discs auch solche mit 66GB und 100GB Speicherplatz. Dank des H.265-Codecs reichen die 50GB-Varianten für einen zweistündigen Film in 4K jedoch vollkommen aus. Erst wenn längere Filme oder höhere Frameraten gespeichert werden, braucht man die größeren Discs. 4K-UHD-Blurays unterstützen Bildraten bis 60Hz.²⁰² Mittlerweile haben erste Endgeräte zur Wiedergabe den europäischen Markt erreicht. Neben dem Vorreitermodell UBD-K8500 von Samsung bietet z.B. auch Panasonic einen ersten Player mit der Modellbezeichnung DMP-UB900 an.²⁰³ Die hohen Preise (Panasonic-Gerät kostet aktuell etwa 800€) werden erwartungsgemäß fallen, wenn der Markt wächst. Die Geräte sind abwärtskompatibel und spielen herkömmliche Blurays und DVDs weiterhin ab. Als Videoschnittstelle kommt bislang HDMI zum Einsatz.



Abb. 44: Logo für 4K-UHD-Bluray

²⁰⁰ vgl. 4K-Special 3, S. 13

²⁰¹ vgl. <http://www.4kbluray.de/>

²⁰² vgl. ebenda

²⁰³ vgl. panasonic.com: <http://www.panasonic.com/de/consumer/home-entertainment/blu-ray-set-top-box/player/dmp-ub900.html>, Abruf im März 2016

9.4 Kinoauswertung

Mittlerweile sind in vielen Kinos digitale Projektionsgeräte im Einsatz. Aus Betreibersicht ergeben sich dadurch große ökonomische Vorteile, da letztlich den einzelnen Spielstätten nur Dateien zur Verfügung gestellt werden müssen. Außerdem entfallen Prozesse wie das Wechseln der Filmrollen oder das Zurückspulen. Ein analoges 35mm-Filmnegativ hat je nach Empfindlichkeit eine vertikale Auflösung von etwa 3000 Zeilen.²⁰⁴ Durch die notwendigen Kopierprozesse sinkt diese Auflösung in der Verarbeitungskette, so dass die Positivkopien, die letztlich in deutschen Kinos gezeigt werden, nur noch eine Auflösung von etwa 1000 Zeilen aufweisen.²⁰⁵ Das entspricht ungefähr einer HD-Auflösung mit 1080 Zeilen. Bislang werden die meisten analog gedrehten Kinofilme nur in 2K (1080 x 2048) abgetastet, wobei immer häufiger auch 4K-Kopien in Cineplex-Kinos gezeigt werden. Es ist möglich, das Originalmaterial neu in 4K abzutasten und damit ein UHD-1-Master zu erstellen. Für ein UHD-2-Master reicht die Auflösung von analogem 35mm-Film jedoch nicht mehr aus.

9.5 Verfügbarkeit von UHD-Inhalten im Jahr 2016

Welche Distributionsmöglichkeit sich am Ende durchsetzen wird, hängt sehr stark von der jeweiligen Anwendung ab. Entscheidend für die Entwicklung wird die Verfügbarkeit von Inhalten sein. Im Bereich der physischen Medien wurden im letzten Jahr mangels Alternativen vereinzelt 4K-Versionen von Filmen auf einem USB-Stick zur herkömmlichen Bluray beigelegt. Mittlerweile gibt es erste 4K-UHD-Blurays zu kaufen. Allerdings ist die Auswahl sehr eingeschränkt. Bis Ende 2016 sind jedoch zahlreiche Neuerscheinungen angekündigt. Bislang listet die Internetpräsenz *4kbluray.de* ca. 80 Titel, die bis Dezember dieses Jahres erhältlich sein werden.

Neben 4K-Blurays werden die Streaminganbieter maßgeblich die Inhaltsentwicklung von UHD mitbestimmen. Bereits jetzt sind US-Serien wie *House of Cards* und *Breaking Bad* im 4K-Stream verfügbar. Hier muss der empfangende Haushalt allerdings über die entsprechende digitale Infrastruktur angebunden sein. Diese Voraussetzung ist in Deutschland aktuell nicht in vollem Maß gegeben ist, wie in Kapitel 9.2 gezeigt wurde. Gleiches gilt als problematisch für die Verwertung von UHD-Live-Signalen. Hier kommt, wie in Kapitel 5.7 gezeigt, erschwerend hinzu, dass leistungsstarke Live-Encoder bislang noch in der Entwicklungsphase

²⁰⁴ vgl. Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Digitales_Kino#Bildaufn.C3.B6sung, Abruf im Januar 2016

²⁰⁵ vgl. ebenda

stecken. Die ersten angesprochenen Testproduktionen sind jedoch schon recht vielversprechend. Allerdings beschränkt sich entsprechende Streaming-Hardware auf den professionellen Bereich. Ein Beispiel für eine solche Hardware ist der *Hero 4K Live Encoder* des amerikanischen Herstellers *Mediaexcel*, der 4K-Videosignale mit bis zu 60 Bildern pro Sekunde über vier 3G-SDI-Leitungen entgegennimmt und in Echtzeit als H.265-Stream mit 10Bit encodiert.²⁰⁶ Bislang sind UHD-Live-Videokonferenzen für den privaten Endkunden nicht erschwinglich. Wenn die Auswahl an Hardware größer wird und die Preise weiter fallen, ist aber ein großer Markt dafür zu erwarten. Im folgenden Kapitel sollen weitere denkbare Anwendungsszenarien für UHD skizziert werden, die in Ansätzen bereits Realität sind, zum anderen Teil der Versuch, in die hochaufgelöste Glaskugel zu blicken. Daher kann keinesfalls ein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Es geht an dieser Stelle viel mehr um eine aus den Eigenschaften von UHD abgeleitete Prognose.

10 Mögliche weitere Anwendungsgebiete von UHD

Die in der Arbeit vorgestellten Entwicklungsstände und Trends beziehen sich in erster Linie auf die Nutzung von UHD-TV. Die im Vergleich zu HD deutlich verbesserten Bildparameter eröffnen darüberhinaus viele weitere interessante Anwendungsmöglichkeiten.

Wie bereits aufgeführt, bringen die höheren spezifizierten Bildraten, aber auch die Auflösung Vorteile für stereoskopische Bilddarstellungen mit sich. Zwar hat es 3D-Live-TV nicht über ein Spartendasein hinaus geschafft und die vermutlich letzte Übertragung eines deutschen Fußballbundesligaspiels in 3D vor der Einstellung des Live-Betriebs durch den Sender Sky fand am 16. April 2016 in Leverkusen statt²⁰⁷. Zur gleichen Zeit erfreuen sich Opern- und Ballettübertragungen aus großen Traditionshäusern in die deutschen Kinosäle derzeit großer Beliebtheit. Es gab auch Pilotübertragungen in 4K, die erste bereits 2014 aus der Wiener Staatsoper.²⁰⁸ Gerade durch die großen Projektionsflächen eines Kinosaals bietet UHD hier einen sichtbaren Mehrwert für solche Live-Übertragungen. Denkbar ist

²⁰⁶ vgl. mediaexcel.com: <http://www.mediaexcel.com/products/hero-live.html>, Abruf im April 2016

²⁰⁷ Quelle: unter zwei

²⁰⁸ vgl. elementaltechnologies.com: <http://www.elementaltechnologies.com/newsroom/press-releases/vienna-state-opera-streams-uses-elemental-video-processing-stream-worlds>, Abruf im November 2015

deshalb auch die Übertragung in UHD und gleichzeitig Stereo-3D, bei der der Zuschauer im entfernten Kinosaal das virtuelle Bühnenbild plastisch vor sich sehen kann und aufgrund der hohen Auflösung eine höhere Immersion erlebt als bei einer konventionellen HD-Übertragung. Da bei Kinoübertragungen nur entsprechend wenige Empfangsstationen existieren, ist eine Einrichtung über spezielle Hardware viel schneller zu realisieren als bei einer Verbreitung in alle Haushalte. Letztlich sind hier auch Speziallösungen denkbar, da sich nur Encoder und die relativ wenigen Decoder verstehen müssen. Damit kann ein UHD-2-Video stream durchaus für die Übertragung von linkem und rechtem Kamerasignal genutzt werden. Ähnliches findet bereits heute bei der Übertragung von 3D-TV über einen HD-Feed statt.

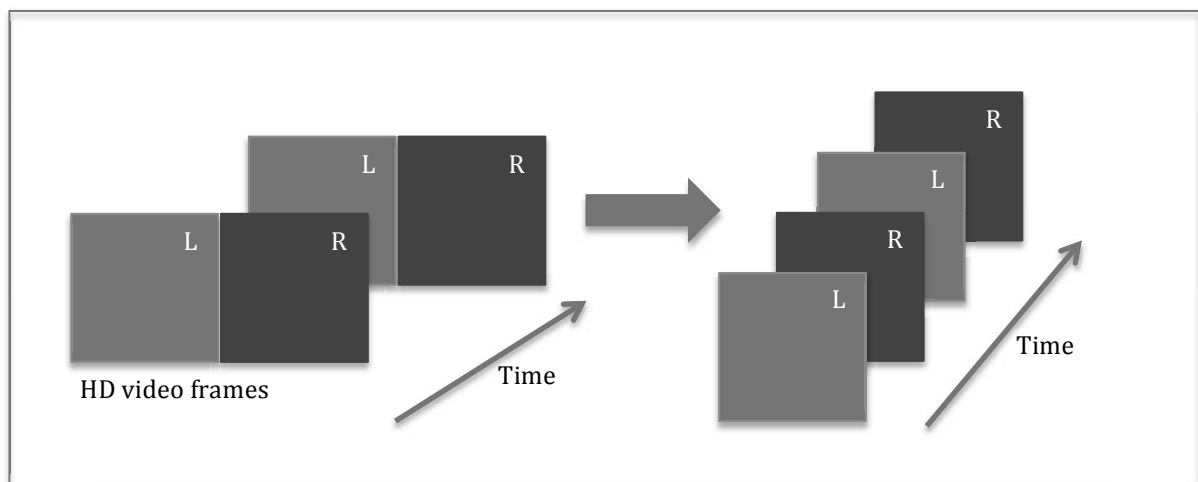


Abb. 45: Side-by-Side-Verfahren

Wie in der Abbildung dargestellt, wird zur Übertragung eines 3D-Bildes ein Frame-Compatible-Format²⁰⁹ genutzt. In der Abbildung 45 ist das Side-by-Side-Verfahren dargestellt, wobei das linke und das rechte Bild mit jeweils halbiert horizontaler Auflösung in einem Videofeed übertragen werden. Im Fall von HD bedeutet das, dass jedes der beiden Videosignale für das linke und rechte Auge eine Auflösung von 1080 x 960 haben. Der Decoder muss in der Lage sein, die beiden Bilder wieder voneinander zu trennen und korrekt darzustellen. Im Fall eines aktiven 3D-Monitors (Shutter) werden die Bilder wie dargestellt, zeitlich nacheinander gezeigt. Die fehlenden Bildpunkte in der Horizontalen werden dabei interpoliert. Eine höhere Auflösung des Gesamtbildes wirkt sich dabei logischerweise

²⁰⁹ bislang das einzige in Deutschland genutzte Verfahren 3D-TV zu übertragen

förderlich auf die Schärfe des Einzelbildes aus. In einem UHD-2-Feed per Side-by-Side übertragene Bilder hätten eine Auflösung von jeweils 4320 x 3840. Damit wäre in der Horizontalen immerhin eine volle 4K-Auflösung gegeben. Allerdings wäre eine bessere Verteilung der Auflösungsreduktion in Horizontale und Vertikale hier wünschenswerter. Ein Verfahren, das über die strikte Trennung der Einzelbilder in vertikaler (Side-by-Side) oder auch horizontaler Richtung (Top-to-Bottom) hinausgeht, ist Quincunx (auch Checkerboard).²¹⁰ Dabei wechselt die Darstellung von linkem und rechtem Bild mit jedem Pixel, so dass das Gesamtbild aus beiden Einzelbildern einem Schachbrettmuster gleicht. Jedes Einzelbild hat eine Auflösung von 3055 x 5430 Bildpunkten, was der achtfachen HD-Auflösung entspricht. Eine solche detailreiche Stereo-3D-Projektion führt zu einem sehr realistischen Bildeindruck. Allerdings sind Bildprädiktion zur Datenkompression komplexer.

In der Überwachungstechnik hat Elektronikhersteller Sony bereits den Mehrwert von UHD erkannt und ein 4K-System auf den Markt gebracht.²¹¹ Eine UHD-1- oder zukünftig UHD-2-Überwachungskamera liefert dem Nutzer dort viel mehr Details als heute zumeist verfügbare Lösungen. Wenn die Live-Videosignale in einen Speicher laufen, wie es bei der Videoüberwachung üblich ist, können die Bilder selbst im Nachhinein auf entscheidende Details untersucht werden, die mit heutiger Technik verborgen bleiben. Auch eine Identifizierung von Personen über Algorithmen der Gesichtserkennung wird dadurch erleichtert. Umgekehrt ist auch die Reduzierung der Anzahl heute notwendiger Kameras möglich, wenn sich die Auflösung einer Kamera auf die 16-fache HD-Auflösung erhöht. Ein großflächiger Platz kann damit unter Umständen von einer Kameraposition aus vollständig abgedeckt werden, ohne dass die Kamera mechanisch bewegt oder optisch gezoomt werden muss. Derartige Kamerabewegungen führen bislang immer auch zu einem Verlust an Information. Dadurch können dem Überwachungspersonal bislang Vorfälle entgehen, da die Kamera gerade „weggeschaut“ hat. Wenn ein Operator sich allerdings nur digital in einem 8K-Bild umschaut, bleiben diese „toten Winkel“ auf der Aufzeichnung erhalten und können im Nachhinein sichtbar gemacht werden. Natürlich sind bei derartigen Anwendungsszenarien immer auch die Aspekte des Datenschutzes zu diskutieren, da insbesondere auf öffentlichen Plätzen eine entsprechende Reglementierung bestehen muss.

²¹⁰ vgl. 3D TV 2012, S. 100

²¹¹ vgl. Sony Pro: <https://www.sony.de/pro/products/video-security-4K>, Abruf im April 2016

Es ist zu erwarten, dass das steigende Auflösungsvermögen von Kameras Grundlage einer notwendigen Diskussion über Persönlichkeitsrechte und Sicherheit darstellen wird.

Auch die Fahrzeugtechnik kann von UHD profitieren. Speziell in Hinblick auf das autonome Fahren oder Assistenzfunktionen können Verkehrssituationen von im Fahrzeug installierten Kameras detaillierter erfasst werden. Die hohen Auflösungen bieten mehr Informationen zur Bildanalyse. So ist es denkbar, dass eine Kamera auch Verkehrsschilder im Vorbeifahren detaillierter erfasst und die Informationen im Zusammenspiel mit weiteren Sensoren auswertet. Erste Prototypen von Fahrzeugen existieren bereits. Allerdings sind ähnlich des Überwachungsbereiches auch hier Diskussionen erforderlich. Fraglich ist, inwieweit dem Menschen die Kontrolle über das Fahrzeug entzogen werden kann, denn Intuition spielt im Straßenverkehr nach wie vor eine nicht unwesentliche Rolle. Aber unabhängig davon bietet eine hochauflösende Kamera am Signaleingang mehr Informationen, die von einem Rechner ausgewertet werden können und ein besseres Erkennen von Situationen ermöglichen.

Die Übertagung von UHD-Videos bringt aber auch Vorteile für Live-Video-Konferenzen und Webinare, da mehr Bilddetails erfasst werden. Dadurch ist es möglich, dass jeder Teilnehmer (Client) eines solchen Streams sich je nach Interesse individuelle Bildausschnitte zum genaueren Betrachten auswählen und dennoch z.B. in HD-Qualität betrachten kann. Aufnahmeseitig muss dazu nicht mehr optisch gezoomt und damit der Bildausschnitt von vornherein beschränkt werden. Dem einzelnen Empfänger/Betrachter könnte diese Möglichkeit individuell in die Hand gegeben werden. Steht am Anfang der Signalkette eine 8K-Kamera und ist HD als Zielformat für den Client ausreichend, so ist eine 16-fache Vergrößerung eines beliebigen Bildbereiches möglich. Der Streamingserver muss lediglich in der Lage sein, auf die Anfrage des Clients (Auswahl des entsprechenden Bildbereiches) zu reagieren und den entsprechenden HD-Stream zur Verfügung zu stellen. Diese Art der Interaktivität in Form einer virtuellen Kamerasteuerung ließe sich auch auf Streams von Sportveranstaltungen übertragen, wodurch der Zuschauer in die Lage versetzt würde, selbst zu zoomen und zu „schwenken“.

Speziell die Betrachtung von UHD-2-Bildern setzt sehr große Betrachtungsflächen voraus, wie in Kapitel 5.1 gezeigt wurde. Damit ist die Technologie für Anwendungsszenarien

interessant, wo bislang Mehr-Monitor-Lösungen erforderlich sind. Das ist zum Beispiel in großen Kontrollräumen auf Flughäfen oder Zentralen von öffentlichen Verkehrsbetrieben der Fall. Neben Kamerabildern können selbstverständlich alle Arten von Zusatzinformationen visualisiert werden. Insbesondere durch die OLED-Technologie werden hier Lösungen möglich, die den Platzbedarf und Energiebedarf sehr stark reduzieren. Denkbar sind auch Räume, deren Wände komplett dünnen OLED-Displays bestückt sind. Damit sind 360°-Projektionen einer virtuellen Realität innerhalb eines Raumes möglich, die zwangsläufig nach hohen Auflösungen verlangen. Auch im Heimbereich könnten derartige OLED-Folien selbst klassische Displays ablösen und gleichzeitig Räume je nach aktueller Stimmung beleuchten.

Das derzeit in der Medienbranche viel diskutierte Thema VR (Virtual Reality) profitiert ebenso von den UHD-Bildauflösungen. Die entsprechenden Brillen bringen die betrachtete Projektionsfläche sehr nahe an das Auge. Damit ist der Winkel der Betrachtung α viel größer als es beim Betrachten eines Fernsehgerätes oder Computerbildschirmes üblicherweise der Fall ist. Wie in Kapitel 5.1 dargestellt wurde, ist damit die Bedingung für die Notwendigkeit einer höheren Auflösung geschaffen, damit das Pixelraster vom Auge nicht mehr erfasst werden kann. Hier tragen 4K- oder gar 8K-Projektionen zu einer realistischeren Darstellung von Bildinhalten bei.

11 Blick nach vorn

Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Schmidt beschrieb 2004, dass die Entwicklung von HDTV aus Sicht der Zuschauer nicht auf große Akzeptanz stoße, da eine Zufriedenheit mit dem bis dato verbreiteten SD-System bestehe, bzw. sogar visuell noch schlechtere VHS-Aufnahmen eine befriedigende Qualität aus Konsumentensicht lieferten. Diese Tatsachen wertete er als Vorzug des Zuschauers der Television vor der Telepräsenz.²¹² Im Nachhinein nahm die Entwicklung einen völlig anderen Verlauf und heute ist HD der Quasi-Standard in der Videotechnik. Diese Einschätzung zeigt zugleich im Hinblick auf UHD, dass es sehr schwer ist, zu prognostizieren, welchen Verlauf technische Entwicklungen im Videobereich nehmen, da der Konsument zum einen die Vorteile einer neuen Technologie nicht kennt, bevor er sie

²¹² vgl. Schmidt 2005, S. 215, Abs. 2

selbst erlebt hat. Zum anderen versuchen die Marketingabteilungen der Elektronikhersteller die Endkunden von immer besseren Geräten zu überzeugen, selbst dann, wenn der tatsächliche Mehrwert gar nicht gegeben ist.

Um die Frage der vorliegenden Arbeit zu beantworten, ob Deutschland bereit für UHD sei, muss die anfangs festgelegte Differenzierung nach dem klassischen Bildübertragungssystem aufgegriffen.

Akquiseseitig wird bei größeren Videoprojekten (z.B. Werbung und Spielfilm) schon seit längerem auf Auflösungen von 4K bis sogar 6K gesetzt. Die Zukunftssicherheit ist dabei ein Argument. Es geht dabei außerdem um die aufgezeigten Möglichkeiten im Postproduktionsworkflow. Bildeingriffe, wie z.B. digitale Zooms und selektive Farbkorrekturen können detaillierter durchgeführt werden und haben quasi keinen sichtbaren Qualitätsverlust zur Folge, wenn ein HD-Master am Ende der Produktionskette steht. Auch erste Live-Applikationen, bei denen z.B. für eine Zeitlupe in HD-TV in ein 4K-Slomo-kamerasignal gezoomt wird, existierten bereits. Denkbar ist an dieser Stelle zukünftig sogar dem einzelnen Zuschauer in einem UHD-Bild selbst seinen HD-Bildausschnitt festzulegen, sich visuell in dem Bild zu bewegen. Diese Anwendungen haben gemeinsam, dass am Ende auf dem Bildschirm ein HD-Bild betrachtet wird. Die ersten Kameras, die über 8K-Sensoren verfügen, sind bereits verfügbar. Bislang gibt es allerdings kaum Projekte, die in UHD-2 aufgezeichnet werden. Wenn 4K als Auslieferungsformat beim Zuschauer oder Anwender ankommt, wird 8K im Premiumbereich die heutige 4K-Akquise ablösen. Dadurch können die Vorteile von Auflösungspuffer für die Postproduktion, die UHD-1 heute gegenüber HD bietet, aufrechterhalten werden.

Im Bereich der Bilddarstellung wird zunächst UHD-1 die Endkunden erreichen. Erste Geräte stehen bereits in den Privathaushalten. Es ist zu erwarten, dass sowohl Computermonitore, als auch Fernsehgeräte vermehrt mit 4K-Auflösungen angeboten werden. Über UHD-2-Umsetzungen wird momentan sehr viel spekuliert. Die OLED-Technologie ermöglicht sehr große Bilddiagonalen und ist somit auch förderlich für eine Verbreitung von 8K. Denkbar sind UHD-OLED-Leinwände anstelle von Projektoren. Eine UHD-2-Displaywand kann neben einem Videosignal theoretisch auch eine Vielzahl weiterer Bildinhalte (z.B. virtuelle

Landschaftsbilder, Tempertaturanzeige, animierte Werbung an Hausfassaden) darstellen oder einfach zur Beleuchtung genutzt werden. Die sich daraus ergebenden Nutzungsmöglichkeiten sind sowohl für den Heimbereich, als auch für industrielle Anwendungen vielfältig. Möglicherweise wird UHD-2 zunächst hausintern (oder firmenintern) eine Rolle spielen, wobei ein Rechner verschiedene Bildinhalte (HD-TV-Signal, GUIs usw.) entgegennimmt und auf einer UHD-2-aufgelösten OLED-Wand an einer gewünschten Stelle ausgibt. Für diese kurzen Übertragungswege steht mit Displayport bereits eine relativ günstige Schnittstelle zu Verfügung.

Der Bereich der Distribution ist in Deutschland bislang nur bedingt auf UHD vorbereitet. Zwar besteht sowohl mit den aktuellen Breitbandanschlüssen (>25Mbit/s) und konventionellen TV-Übertragungswegen wie DVB-S2 und dem noch in diesem Jahr in Deutschland verfügbaren DVB-T2 die Möglichkeit, zumindest UHD-1-Streams zu verbreiten. Allerdings sind die notwendigen Empfangsgeräte und Decoder, die H.265-Codec unterstützen, in den Haushalten bislang kaum verfügbar. Es ist daher zu erwarten, dass die UHD-Inhalte zunächst über Streamingdienste wie z.B. Netflix und Amazon Prime Video, sowie 4K-UHD-Bluraydisks und Pay-TV-Anbieter den Weg aufs Display der ersten Endkunden (Early Adopters) schaffen werden. Pilotprojekte von Sky Deutschland zeugen davon, dass durchaus reges Interesse an 4K-Distributionen seitens des Senders besteht. International ist die japanische Fernsehanstalt NHK führend, was die Übertragung von UHD-Inhalten angeht. In diesem August wird der Sender einzelne Veranstaltungen der Olympischen Sommerspiele aus Rio de Janeiro in UHD-1 übertragen. Für 2018 kündigten die Japaner erste UHD-2-Sendungen an. Ihr ambitioniertes Ziel ist es, die Olympischen Spiele 2020 aus Tokyo sowohl in 4K, als sogar 8K zu übertragen.²¹³ Von einem UHD-2-Broadcast ist Deutschland sehr weit entfernt. Eine Grundvoraussetzung wäre die flächendeckende Anbindung der privaten Haushalte über Glasfaserleitungen.

²¹³ vgl. Tentative Report, 9. 9. 2014, Ministry of internal Affairs and Communication

http://www.ikegami.de/news_detail/worlds-first-hand-held-8k-ultra-high-definition-television-camera-system.html

Dass eine solche Distribution von UHD-2 auf konventionelle Displays in privaten Haushalten überhaupt sinnvoll ist, wird nach den Analyseergebnissen dieser Arbeit bezweifelt. Grundlage dieser Feststellung ist der Vergleich der örtlichen Auflösung von UHD-2-Video und den physiologischen Limitierungen der visuellen Wahrnehmung des Menschen (siehe Kapitel 5.1). In Verbindung mit den typischen örtlichen Gegebenheiten eines TV-Gerätes werden dabei Bildschirmgrößen erforderlich, die schlichtweg die Größe des Raumes (z.B. Wohnzimmer) überschreiten. Auch für Public Viewing-Szenarien oder Kinoprojektionen ist UHD-2 nur sinnvoll, wenn die Zuschauer entsprechend nahe an der Projektionsfläche sind. In vielen Cineplex-Kinos mit ihren recht großen Leinwänden sind bereits 4K-fähig. Für die Arbeit an einem großen Computermonitor mit geringerem Betrachtungsabstand kann 8K unter Umständen einen Mehrwert bieten, besonders, wenn es auf viele Details ankommt. So könnten beispielsweise Konstrukteure davon profitieren. Ein denkbarer weiterer Anwendungsfall sind VR-Brillen. Dort beträgt der Abstand zur Projektionsfläche nur wenige Zentimeter.

Im Ergebnis wird festgestellt, dass eine Erweiterung des Farbraumes nach BT.2020 und damit einhergehende Vergrößerung des Bildkontrastes, sowie eine Erhöhung der Bildrate weit mehr positiven Einfluss auf die Immersion des Zuschauers haben können, als die bloße Erhöhung der Auflösung, die in vielen Fällen vom Betrachter gar nicht mehr wahrgenommen werden kann. Die Ankündigung der Öffentlich-Rechtlichen Rundfunkanstalten über DVB-T2 ein 1080p50-Stream zu senden, verspricht einen Mehrwert, insbesondere für Sportübertragungen mit aller Regel sehr schnell bewegten Objekten.

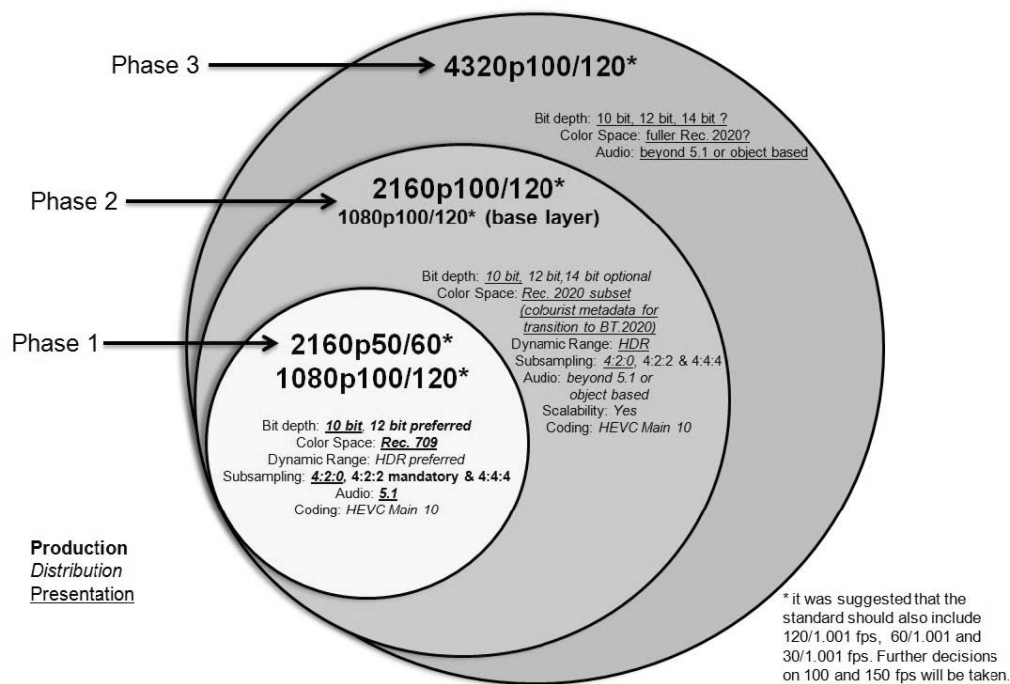


Abb. 46: Drei prognostizierte Phasen von UHD-Umsetzung²¹⁴

Wann und ob UHD-1 in Deutschland flächendeckend von allen Sendern verbreitet wird, kann im Jahr 2016 nicht final beantwortet werden. Offensichtlich sind nur die großen Gegensätze in der Entwicklung. Während in Japan bereits Broadcast-Kameras gebaut werden, die UHD-2 ermöglichen, stellt der Saarländische Rundfunk 2016 gerade seinen Schaltraum von SD auf HD um. Der klassische Rundfunk wird in den nächsten Jahren wohl kein UHD senden. In Deutschland besteht momentan nicht die Infrastruktur, um flächendeckend Haushalte mit Live-UHD-Videostreams zu versorgen, da entsprechende Encoder noch nicht effizient genug arbeiten. Außerdem stellt sich die Frage, ob man die Tagesschau in 8K sehen muss. Die Auflösungen jenseits von HD werden im TV-Bereich in den kommenden Jahren auf Premiumproduktionen (z.B. große Events und Spielfilme) beschränkt bleiben. Löst man sich allerdings von der Vorstellung des klassischen Fernsehens, so eröffnet UHD vielversprechende neue Möglichkeiten und immersivere Bilderlebnisse. Für Video-on-Demand-Dienste wird UHD bald eine sehr große Rolle spielen und auch die im vorigen Kapitel dargestellten Anwendungsszenarien zeigen nur beispielhaft, welches Potential sich hinter Ultra-High-Definiton-Video verbirgt. Aus technischer Sicht ist Deutschland mit aufgezeigten Einschränkungen im Distributionsbereich bereit für UHD. Ob es auch die Anwender sind, wird sich zeigen. Die Prognosen sprechen dafür.

²¹⁴ Semtech, S. 11

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Klassisches Bildübertragungssystem	7
Abb. 2: Prognose über den Absatz von UHD-TV-Geräten (2013 erhoben)	8
Abb. 3: Umsätze mit Video on Demand in Deutschland von 2004-2012 und Prognose	9
Abb. 4: Wellenlängenbereiche elektromagnetischer Strahlung	10
Abb. 5: Zöllner-Täuschung	11
Abb. 6: Das menschliche Auge	13
Abb. 7: Vorkommen von Photorezeptoren im menschlichen Auge in Mio.....	14
Abb. 8: Spektrale Hellempfindung des Menschen in Abh. der Wellenlänge des Lichtes	15
Abb. 9: RGB-Farbraum	16
Abb. 10: Abtaststrukturen im Vergleich.....	21
Abb. 11: Blockschaltbild eines MPEG-Encoders.....	22
Abb. 12: Serialisierung von HD-Signalen.....	26
Abb. 13: Vergleich der Luminanzvektoren von ITU-R 709 und ITU-R BT656	26
Abb. 14: RGB-Farbwürfel	30
Abb. 15: CIE-Diagramm	31
Abb. 16: Bildschirmgrößen bei einem Betrachtungsabstand von 2,75m.....	36
Abb. 17: Darstellung der Bewegungsunschärfe in Abhängigkeit von der Sensorauflösung ..	37
Abb. 18: Shutter-Effekt bei 50Hz Bildrate in Abhängigkeit von der Belichtungszeit.....	39
Abb. 19: Kontrastwahrnehmungsfähigkeit des Menschen	42
Abb. 20: Abwärtskompatible Übertragung eines HDR-Videos.....	43
Abb. 21: Der erweiterte Dynamikbereich durch HDR	43
Abb. 22: Farbräume im Vergleich	44
Abb. 23: Vergleich der PSNR-Werte von H.265 und H.264	51
Abb. 24: Vergleich der Codier-Effizienz in Abh. von Encodierzeit.....	53
Abb. 25: Vergleich der Datenraten in MB/s von RED-RAW-Videodaten unterschiedl. Aufl.	57
Abb. 26: Vergleich von Film- und Sensorbelichtung	58
Abb. 27: : Ausleseverfahren von Bildwandlern.....	60
Abb. 28: Bayer-Matrix.....	62
Abb. 29: Lineare und logarithmische Gammakurve im Vergleich.....	63
Abb. 30: Two- Sample Division Mapping eines UHD-1-Videos	74

Abb. 31: Two-Sample Division Mapping eines UHD-2-Videos	74
Abb. 32: Vergleich der Leitungsanzahl unterschiedlicherer Übertragungsnormen.....	75
Abb. 33: Dämpfungseigenschaften von Glasfaser im Infrarotbereich	77
Abb. 34: Daisy Chaining mehrerer Monitore über Displayport	82
Abb. 35: Nutzung von TV-Funktion in Deutschland	83
Abb. 36: Prognose Absatz von UHD-TV-Geräten bis 2018.....	83
Abb. 37: Tägliche Mediennutzungsdauer in Minuten in Deutschland 2015.....	86
Abb. 38: Anteile verschiedener Übertragungswege an TV-Haushalten in Deutschland	87
Abb. 39: Time-Frequency-Slicing bei DVB-T2.....	89
Abb. 40: Übertragbare Programme pro Multiplex-Kanal bei DVB-T und DVB-T2	90
Abb. 41: Anteil von Glasfaseranschlüssen im internationalen Vergleich (Stand 2014)	91
Abb. 42: Verbreitung von Breitbandanschlüssen in Dresden	92
Abb. 43: Umsätze von Video-on-Demand-Diensten in Deutschland bis 2017.....	93
Abb. 44: Logo für 4K-UHD-Bluray.....	94
Abb. 45: Side-by-Side-Verfahren.....	97
Abb. 46: Drei Phasen von UHD-Umsetzung	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Common Image Format - Übersicht	27
Tabelle 2: MPEG-4-Profile und –Ebenen im Überblick	29
Tabelle 3: : Bildschirmprimärvalenzen bei SDTV.....	32
Tabelle 4: Bildschirmprimärvalenzen bei HDTV nach Rec. 709.....	32
Tabelle 5: Bildgröße in Abh. der Aufl. bei einem Betrachtungsabstand von 2,75m	35
Tabelle 6: Definition der Primärvalenzen nach BT.2020.....	44
Tabelle 7: Geläufige Übertragungsbandbreiten.....	49
Tabelle 8: Vergleich von H.264- und H.265-Kompression (zeitunkritisch).....	49
Tabelle 9: Auszug über max. Bildraten der H.265-Level 5 - 6.2 mit ihren Spezifikationen	50
Tabelle 10: Beispiele für Consumer-Kameras	55
Tabelle 11: Beispiele für semiprofessionelle Kameras.....	55
Tabelle 12: Beispiele für professionelle Kameras	55
Tabelle 13: Gegenüberstellung von Videodatenraten und Speichergeschwindigkeiten	65
Tabelle 14: Überblick XAVC-Formate.....	69
Tabelle 15: Vergleich der bislang definierten UHD1-konformen ProRes-Formate	70
Tabelle 16: Überblick über aktuelle DnxHR-Spezifikationen	71
Tabelle 17: Übersicht über aktuelle und zukünftige SDI-Normen	73
Tabelle 18: Überblick über ausgewählte HDMI-Normen	80

Literaturverzeichnis

Print

- | | |
|-------------------------|---|
| Apple ProRes-Whitepaper | Apple ProRes Whitepaper, Juni 2014, Apple Inc. |
| Beyond HD 2014 | White Book Beyond HD, Arbeitsgruppe Ultra HD der Deutschen TV-Plattform, August 2014 |
| Bing 2010 | 3D and HD – Broadband Video Networking, Benny Bing, Artech House Boston, London 2010, ISBN: 978-1-60807-051-0 |
| BT.2020 2012 | Recommendation ITU-R BT.2020, Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange, August 2012, International Telecommunication Union |
| Broadcast 2015 | Film-TV-Video-Sonderheft, 3/2015, Nonkonform GmbH |
| Ehrmann 2015 | Tiefenschärfe und Auflösungsvermögen: Das menschliche Auge, Andrea Ehrmann, Tomasz Blachowicz, in Physik unserer Zeit 3/2015(46), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim |
| ETSI 2010 | Technical Report: Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital transmission system for cable systems (DVB-C2), EBU, DVB, 2010, Reference: DEN/JTC-DVB-240 |
| ETSI 2015 | Technical Report: Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: S2 Extensions (DVB-S2X), EBU, DVB, 2015, Reference: DTR/JTC-DVB-354-2 |
| Eustachi 2009 | Digitale Fernsehtechnik, Wolfgang Eustachi, Books on Demand GmbH Norderstedt 2009, ISBN: 978-3-8391-7329-9 |

Film-TV-Video-1-2014	Film-TV-Video 4K-Special Heft 1, 2014, Sonderpublikation der Online- Plattform film-tv-video.de, Nonkonform GmbH Konradinstr. 3, 81543 München
Film-TV-Video-2-2014	Film-TV-Video 4K-Special Heft 2, 2014, Sonderpublikation der Online- Plattform film-tv-video.de, Nonkonform GmbH Konradinstr. 3, 81543 München
Film-TV-Video-3-2014	Film-TV-Video 4K-Special Heft 3, 2014, Sonderpublikation der Online- Plattform film-tv-video.de, Nonkonform GmbH Konradinstr. 3, 81543 München
Fraunhofer IIS 2013	Fraunhofer INstitut für integrierte Schaltungen IIS, Presseinformation, 3. September 2013
Götz 2013	Vorlesungsskript Innovative Medientechnologien, Studiengang Industrial Management, Prof. H.-J. Götz, Prof. Dr. L. Otto
Hagendorf 2011	Wahrnehmung und Aufmerksamkeit – Allgemeine Psychologie für Bachelor, Dr. Herbert Hagendorf, Prof. Dr. Joseph Krummenbacher, Prof. Dr. Hermann-Joseph Müller, Prof. Dr. Torsten Schubert, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, ISBN: 978-3-642-12709-0
HD-Signale über die Hausantenne	Artikel in Fachzeitschrift „Film, TV, Video“, Juni 2015
Schäfer 2013	UHD und 4K – FKTG Kolloquium IRT München 2013, Schäfer, R.,
Semtech	UHD-SDI Standards Overview – Towards a Hierarchy of SDI Data Rates, John Hudson, Corporation – Gennum Products Group
SKC 4065	SKC 4065 Operation Manual, 1st Edition 2014, Sony Corporation

IRT 2014	Präsentation Netzinfrastrukturen Studio Produktion Kolloquium des Instituts für Rundfunktechnik 2014 München, Berg, Langhans, Baumann, Metz
KEF-Bericht 2014	19. Bericht der Kommission zur Ermittlung des Finanzbedarfs der Rundfunkanstalten, Februar 2014
Kompendium HD 2012	Kompendium HD-Grundlagen, Dipl. Ing. (FH) Mathias Bürgel, Hochschule der Medien Stuttgart, 2012
Lynx AG	Technical Specifications Yellow Brick OBD 1810
Mediaexcel.com	Website des gleichnamigen Zusammenschlusses von Videoexperten unter Jongil Kim
Movie Labs 2013	MovieLabs Specification for Next Generation Video – Version 1.0, 2013, Motion Pictures Laboratories, Inc.
Rec. ITU-T H.265-v3 2015	ITU-T, H.265 (04/2015), Series H: Audiovisual and multimedia systems, Infrastructure of audiovisual services – Coding of moving video
Reimers 2008	DVB – Digitale Fernsehtechnik – Datenkompression und Übertragung, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008, ISBN: 978-3-540-43490-0
Riggert 2002	Rechnernetze – Grundlagen – Ethernet – Internet, 2. Auflage 2002, Dr. Wolfgang Riggert, Fachbuchverlag Leipzig im Carls Hanser Verlag, ISBN: 3-446-21-984-6
Schmidt 2005	Professionell Videotechnik, Professor Dr. rer. nat. Ulrich Schmidt, 4. Auflage, ISBN: 978-3-540-24206-2, Springer- Verlag Berlin Heidelberg 2005
Tanenbaum 2003	Computernetzwerke, 4., überarbeitete Auflage, Andrew S. Tanenbaum, ISBN: 3-8273-7046-9, Pearson Studium 2003
XAVC-Whitepaper	XAVC Specification Overview, Revision 2.1, 7. April 2014, Sony Corporation

Zschockelt 2007	Vorlesungsskript Videotechnik von Prof. Dr.-Ing. Rainer Zschockelt, Hochschule Mittweida, Fakultät Medien
3D TV 2012	3D TV and 3D Cinema – Tools and Processes for Creative Stereoscopy, Bernard Mendiburu, Yves Pupulin, Steve Schklair, Elsevier 2012, ISBN: 978-0-240-81461-2
Online	
Adobe Blog	Blog des Software-Produzenten Adobe, blogs.adobe.com
Apple.com	http://www.apple.com/de/imac/ , Website von Apple Inc.
Avid.com	Website des Softwareproduzenten für Videoschnittlösungen
BET	http://www.bet.de , Website von Base of Expert Training in Hamburg
cnet.com	Website mit technischen Fachartikeln
Digi.bg.Verf. 2015	https://wikibooks.org/wiki/Digitale-bildgebende_Verfahren:_Wiedergabe
Digitaltrends.com	http://www.digitaltrends.com , Blog zu Themen der digitalen Welt
elementaltechnologies.com	Website von Elemental Technologies, Videodienstleister für Streaming mit Sitz in Portland
Fernseh-/ kinotechn. Gesellsch.	Fernseh- und Kinotechnische Gesellschaft e.V., www.fktg.orgd
H.265.org	http://x265.org , Website der Firma Multicore Ware
HDMI.org	http://www.hdmi.org/index.aspx , offizielle Website der HDMI-Spezifikation
Marcotec-shop.de	Website der AF Marcotec GmbH, Händler für Medientechnik

Mindfactory.de	Mindfactory AG, Onlinehandel für Computertechnik
RED	Website des Kameraherstellers RED, http://de.red.com
Ryan 1994	http://humanities.uci.edu/mposter/syllabi/readings/ryan.html , Immersion vs. Interactivity: Virtual Reality and Literary Theory, Ryan, Marie Laure
sdcard.org	https://www.sdcard.org/join/faq/index.html , Offizielle Website der SD Association, des Zusammenschlusses aus Firmen, der die Standardisierung von SD-Karten festlegt
Slansky 2015	Das Objektiv im Zeichen von UHD/4K, Präsentation anlässlich IRT-Kolloquium 2015 an der Filmuniversität Babelsberg Konrad Wolf , Prof. Dr. Ing. Peter Slansky
Sony Pro	Sony Professional Website, http://www.sony.de/pro
spektrum.de	http://www.spektrum.de/lexikon/optik/pupille/2698 ,
telekom.de	Website der Deutschen Telekom
itu.in	http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2012/31.aspx#.VbeMAULtIH4
itwissen.info	Das große Online-Lexikon für Informationstechnologie, DATACOM Buchverlag GmbH

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der genannten Literatur und Hilfsmittel erstellt habe.

Martin Lechtschewski

Dresden, 29. Mai 2016